

Title	漏えい同軸の無線位置検出応用に関する研究
Author(s)	西川, 健一
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2088
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

漏えい同軸の
無線位置検出応用に関する研究

西川 健一

大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻

2010年 1月

謝辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授小牧省三博士の御指導の下に、筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行った研究成果をまとめたものである。本研究の遂行にあたり、懇篤なる御指導、御鞭撻を賜った小牧省三教授に衷心より謝恩の意を表する次第である。

本論文をまとめるに際し、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授河崎善一郎博士、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻准教授塚本勝俊博士に懇切丁寧なる御教示、御助言を賜った。ここに深く感謝の意を表する次第である。

大阪大学大学院在学中より情報通信工学全般および本研究に関して御教示、御助言を賜った大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授滝根哲哉博士、同北山研一博士、同馬場口登博士、同三瓶政一博士、同井上恭博士、ならびに大阪大学産業科学研究所教授鷲尾隆博士、同溝口理一郎博士をはじめとする諸先生方に厚く感謝申し上げます。

また、常日頃より熱心な御討論と貴重な御助言、御好意溢れる御支援を賜った大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻助教東野武史博士に心より感謝申し上げます。

また、研究の途上、有益な御助言と御協力、御激励を頂いた藤澤幸弘氏(現 西日本電信電話株式会社)、小野敦志氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻小牧研究室の諸兄に感謝申し上げます。

また、実験装置を提供して頂くとともに有益な御助言を頂いた藤田技術士事務所、株式会社 NTT ファシリティーズ、住友電設株式会社、株式会社フジクラの関係諸氏に感謝申し上げます。

最後に、本研究遂行に際し、支え励ましてくれている家族ならびに関連の諸氏に感謝する所存である。

内容梗概

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行った漏えい同軸の無線位置検出応用に関する研究の成果をまとめたものであり、以下の5章により構成する。

第1章は序論であり、本論文における研究背景として関連分野の研究動向について概説すると共に、本研究の占める位置と研究目的を明らかにする。

第2章では、最初に漏えい同軸ケーブルの構造と指向特性について述べ、二次元位置検出方式として、電波の到着時刻 (TOA: Time of Arrival) と受信信号の強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を用いる方式を提案する。提案方式における電波の到着時刻と信号強度を実験により測定し、位置検出原理を実証すると共に、提案する位置検出方式の誤差を求め評価する。

更に、漏えい同軸ケーブルの終端で信号を反射させることで、第一波と第二波の2波を漏えい同軸ケーブルから放射させ、生じた2つの伝搬経路のそれぞれの到着時刻を用いて二次元位置検出を行う方式を提案し、実験によって位置検出原理を実証すると共に、位置検出誤差を求め評価する。

第3章は、送信機と受信機間の時間同期を不要とする、複数の電波の到着時刻差 (TDOA: Time Difference Of Arrival) を用いる方式を提案する。漏えい同軸ケーブルを屈曲配置することによって、電波の伝搬経路の数を4つに増加させ、4つのTOAから選択した3つのTDOAを用いて、位置検出を可能としている。本方式の位置検出可能領域を導出すると共に、実験により位置検出原理を実証し、位置検出誤差を求め評価する。

第4章は、二方向に指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用いて、漏えい同軸ケーブルを進行して行く2波と終端で反射してくる2波を空間に放射させ、これら4波のTDOAを用いて二次元位置検出を行う方式を提案する。まず、漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件を示した後、FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain method) を用いたシミュレーションにより給電点と受信アンテナ間の4波の伝搬路応答を導出する。次に4波の到着時刻差から端末の二次元位置検出を行う位置検出原理について説明する。最後にシミュレーションによって位置検出誤差を求めると共に、位置検出可能領域の面積を評価する。

第 5 章は結論であり，本研究で得られた成果について総括を行う．

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 位置検出方式	3
1.3 先行研究とシステム	5
1.3.1 従来の位置検出システム	5
1.3.2 従来の位置検出に関する研究	7
1.3.3 地下街における位置検出の問題	8
1.4 漏えい同軸ケーブル	8
1.5 研究目的	10
1.6 論文構成	10
第2章 終端反射を用いた到着時刻位置検出方式	13
2.1 序言	13
2.2 漏えい同軸ケーブル	13
2.2.1 構造	13
2.2.2 放射特性	13
2.3 本論文で提案する位置検出方式の特徴	16
2.4 到着時刻と受信強度を用いた位置検出方式	17
2.4.1 到着時刻と受信強度を組み合わせる方式の原理	17
2.4.2 原理確認実験と誤差評価	23
2.5 終端反射を用いた到着時刻位置検出方式	31
2.5.1 TOA 位置検出方式の原理	31
2.5.2 原理確認実験と誤差評価	35
2.6 終端反射方式の実装に対する考察	39
2.7 結言	40
第3章 終端反射と屈曲配置を用いた到着時刻差位置検出方式	41
3.1 序言	41
3.2 屈曲配置による TDOA 化	41

3.2.1	第一波及び第二波の伝搬経路	41
3.2.2	第三波及び第四波の伝搬経路	43
3.3	提案方式の原理	46
3.3.1	位置の推定式	48
3.3.2	伝搬経路の特定	50
3.4	位置検出可能領域面積の評価	52
3.5	原理確認実験と誤差評価	55
3.6	結言	59
第4章	終端反射と二方向指向性を用いた到着時刻差位置検出方式	61
4.1	序言	61
4.2	二方向指向性による TDOA 化	61
4.2.1	第一波及び第二波の伝搬経路	62
4.2.2	第三波及び第四波の伝搬経路	65
4.3	提案方式の原理	67
4.3.1	位置の推定式	70
4.3.2	伝搬経路の特定	71
4.4	位置検出可能領域面積の評価	73
4.5	位置検出誤差のシミュレーション評価	75
4.5.1	シミュレーション諸元	75
4.5.2	シミュレーション結果	78
4.6	結言	81
第5章	結論	83
	参考文献	85
	本論文に関する原著論文	93
A	学会論文	93
B	国際会議発表 (査読有)	93
C	国際会議発表 (査読無)	93
D	国内大会発表	94

E 国内研究会発表 94

図目次

2.1	漏えい同軸ケーブルの構造	14
2.2	電波が強め合う条件	14
2.3	ラジアル方向と長手方向の定義	15
2.4	電波の等到着時刻線	17
2.5	電波の伝搬損失が等しい線	18
2.6	等到着時刻線と伝搬損失が等しい線の交点	19
2.7	伝搬経路	20
2.8	伝搬損失	21
2.9	実験構成	24
2.10	実験環境	25
2.11	実験風景	26
2.12	インパルス応答の測定例	27
2.13	位置検出誤差の分布	28
2.14	位置検出可能領域の定義	29
2.15	誤差の累積分布	30
2.16	第一波の等到着時刻線	31
2.17	第二波の等到着時刻線	32
2.18	等到着時刻線の交点	32
2.19	第一波の伝搬経路	33
2.20	第二波の伝搬経路	34
2.21	実験環境	36
2.22	インパルス応答の測定例	36
2.23	位置検出誤差の分布	37
2.24	誤差の累積分布	38
3.1	第一波の伝搬経路 (a)	42
3.2	第二波の伝搬経路 (b)	43
3.3	第三波の伝搬経路 (c)	44
3.4	第四波の伝搬経路 (d)	45

3.5	位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせ	47
3.6	伝搬経路特定のための同軸ケーブルの接続	51
3.7	位置検出可能領域と θ_{-1} の関係	53
3.8	最大放射指向角度 θ_{-1} と位置検出可能領域面積の関係	54
3.9	実験環境	55
3.10	インパルス応答の測定例	56
3.11	位置検出誤差の分布	57
3.12	誤差の累積分布	58
4.1	電波の放射指向角度と $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ の関係	62
4.2	第一波の伝搬経路 (a)	63
4.3	第二波の伝搬経路 (b)	64
4.4	第三波の伝搬経路 (c)	65
4.5	第四波の伝搬経路 (d)	66
4.6	位置検出可能領域の形状	68
4.7	位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせ	69
4.8	伝搬経路特定のための同軸ケーブルの接続	72
4.9	$\frac{\lambda_{RF}}{P}$ と位置検出可能領域面積の関係	74
4.10	入力信号波形	75
4.11	シミュレーションにおける座標配置	77
4.12	伝搬路応答例	78
4.13	位置検出誤差の分布	79
4.14	誤差の累積分布	80

表目次

1.1	電波を用いる従来の位置検出方法の特徴	3
2.1	実験諸元	23
4.1	FDTD法のシミュレーション諸元	77

第1章 序論

1.1 研究背景

今日、無線通信端末が急速に普及している。国内の携帯電話加入者数が2009年6月末時点において1億1300万件を超え [1]、人口普及率では88.5%に到達した第三代携帯電話 [2][3] ならびに PHS (Personal Handyphone System) 等のセルラーネットワークに加えて、Bluetooth や ZigBee 等の近距離無線によってネットワークを形成する WPAN (Wireless Personal Area Network) [4]-[13] が普及し、人や物を取り巻く無線通信環境が急速に変化している。携帯電話端末向けの Web ブラウジングだけでなく、インターネットへの接続が可能となる端末として、2009年第2四半期中に世界の販売台数が前年同期比で27%増加した [14] iPhone, BlackBerry に代表されるスマートフォンが流行している。また、ネットブックや UMPC (Ultra Mobile Personal Computer), MID (Mobile Internet Device) と呼ばれる小型ノートパソコンの販売台数がノートパソコン全体の販売台数の33%を占めている [15]。持ち運び可能な小型ノートパソコンの流行により、街中で接続可能なアクセスポイント (AP: Access Point) が一万五千カ所 [16] を超えるなど AP の整備が進み、ノートパソコンからのインターネットへのアクセスが容易になっている。

携帯電話の高機能化とノートパソコンのモバイル化によってその境目が曖昧になり、インターネットへアクセスが可能な小型携帯端末を所持する人が急増している。また、今まで地上の基地局からの電波が届かず、通信が不可能であった地下街や地下鉄構内においては、新たに携帯電話用の基地局やノートパソコンからデータ通信を介してインターネット接続可能な基地局が設置されつつあり、さらに新幹線中で無線 LAN によるインターネット接続サービスが提供される [17]-[20] など、ユーザの生活空間のほとんどの場所において、高速無線通信が可能になっている。携帯電話やスマートフォン、ネットブック等の携帯端末は、外出先でも携帯しやすいため「いつでも」通信しやすい環境が整いつつあり、また都市で生活する人々の生活圏内では、基地局の増加により「どこでも」通信が可能となりつつある。

人が街の中で携帯電話やスマートフォン、ネットブック等の携帯端末を使うとき、これらは以下の役割を持つ。

- 他人と電話やメール，掲示板等を介して連絡を取るためのコミュニケーションツール
- インターネットを用いて情報を得るツール
- ワンセグテレビや音楽を楽しむツール
- ゲームソフトやオフィスで用いるソフト等のアプリケーションを実行するツール
- 手帳やメモ帳の代用となる筆記用具

街の中で携帯電話やスマートフォン，ネットブック等の携帯端末を「インターネットに接続することで情報を引き出すツールとしての役割」として使う場合に位置情報は重要である．携帯端末の位置情報を利用したナビゲーションはもちろんのこと，ほかにも位置情報を必要とするサービスは多く，例えば，子どもの通学における登下校時の防犯や高齢者の徘徊時の早期発見のための位置情報・現場急行サービス [21][22] のような位置探索サービスが提供されている．これらのシステムでは，人の位置情報を基地局に接続されたシステムが入手し，他の人に伝えるという機能を持つ．

もちろん，位置検出の対象となるのは人だけではない．倉庫に収納・保存されている物に RFID (Radio Frequency IDentification) や ZigBee 等のタグを取り付け，タグが通信可能範囲の狭いリーダ (基地局) と通信した場合にタグ及びタグが取り付けられた物がリーダの狭い通信範囲内に存在することを検出することで，タグが取り付けられた荷物の管理を容易にし在庫管理するシステムが作られ，流通システムの一部に導入されることで効率的な流通が行われる [23]．これらのシステムでは，物品の位置情報を基地局に接続されたシステムが入手し，その情報を他者に伝えることで物品を扱うサービスが効率的に運用可能となる．このように，端末が自己の位置を知るだけでなく，インフラ側が人や物の位置を特定することで位置情報を用いたサービスを提供するなど，位置情報の価値が上がり，位置情報を扱う端末の重要性が高まっている．

このように携帯端末や RFID や ZigBee 等の端末にとって，位置情報は重要な情報であるが，その位置情報をどのように手に入れるのか，すなわち携帯端末自身が自己の位置を特定するための手段，あるいは，インフラ側が端末の位置を特定する手段が必要となる．

1.2 位置検出方式

携帯電話やスマートフォン、ネットブック等の携帯端末やRFID (Radio Frequency Identification) や ZigBee 等の位置情報の取得が可能な端末の位置を特定するために、様々な研究が行われている。従来の位置検出方式は表 1.1 に示すように大きく3つに分類することが出来る。1つ目は、電波の“到着時刻”を用いる方式、2つ目は、アンテナから放射された電波の“アンテナからの距離と減衰特性”と“受信信号強度”を用いる方式、3つ目は、電波の“到来方向”を用いる方式の3つである。

表 1.1: 電波を用いる従来の位置検出方法の特徴

推定手段		長所	短所
到着時刻	TOA	正確度が良い	基地局・端末間に時間同期が必須
	TDOA	基地局・端末間に時間同期が不要	基地局間に時間同期が必須
受信信号強度	RSSI	受信機が簡単	マルチパスフェージングの影響を受けやすい
到来方向	DOA	-	複数の指向性アンテナが必須

- 到着時刻を用いる方式

到着時刻を用いる方式は、さらに2つに分けられる。電波の到着時刻 (TOA: Time Of Arrival) または到着時刻差 (TDOA: Time Difference Of Arrival) を用いる方式である。

TOA 方式は、電波の伝搬に要する時間を用いて基地局からの距離を推定する。1つの基地局から放射された電波の到着時刻から、基地局と端末間の距離という一次元的な情報のみが分かる。2つの基地局から到来する電波の到着時刻を用いた場合、推定される端末の位置は二次元座標上の2カ所に絞られるが不確定性が残るため、不確定性を取り除くには3つの基地局を必要

とする。つまり TOA 方式で位置検出を行うためには分散配置された3つ以上の基地局が必要である。さらに TOA 方式では、電波が放射される送信時刻から端末に受信される到着時刻までの時間を正確に把握しなければならないため、基地局と端末は時間同期が取れている必要がある。つまり二次元での位置検出を行う場合は、三つ以上の基地局と端末の時間が正確に同期されている必要がある。

一方、TDOA 方式は、電波が到達する時間は基地局からの距離に比例して長くなる原理を利用している点では同じであるが、複数の基地局から来る電波の到着時刻差を用いる。2つの基地局から到達した電波の伝搬時間差から、基地局間に描かれる双曲線上に端末が存在することが分かる。3つの基地局から到達した電波のそれぞれの時間差を用いることで3本の双曲線が描かれ、交わる位置が端末の位置となる。TDOA 方式では、時間差の測定のために基地局間での精密な時間同期が必要となるが、基地局から同時に電波を放射することで、端末では到着時刻差と伝搬時間差が等しくなるため、基地局と端末間の時間同期は不要となり、端末が時計を持たずとも位置検出が可能である。

実際に TOA 方式は GPS (Global Positioning System) [24]-[27] に使われている。また、TDOA 方式は、無線 LAN (Local Area Network) の AP (Access Point) を用いたポジショニングシステム [28][29] などに使われている。

- RSSI を用いる方式

受信電界強度指標 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) 方式は、電波の減衰量を用いて TOA 方式と同様に基地局と端末間の距離を推定する。基地局から放射された電波は伝搬するにしたがって減衰するが、周辺の環境に応じていくつかの減衰する度合いを示す式が存在する [30]-[36]。減衰する度合いを示す式の一例として、奥村・秦式 [30][31] が知られている。奥村・秦式は、開放地、郊外、中小都市、大都市で実際に試験を行い、そのデータを元に伝搬特性近似式を得たものである。基地局における送信電力と端末における受信電力を元に、奥村・秦式等の電力の減衰量と距離の関係式を用いて基地局と端末間の距離を推定する。TOA 方式と同じように、2つ以下の基地局からの電波では位置検出ができず、3つの基地局から電波を受けるこ

とで位置検出が可能となる．RSSI 方式を屋内に適用する場合，反射波等のマルチパスフェージングの影響により受信電力に変動が生じやすいため，あらかじめ位置検出を行う領域の電界強度をマッピングすることで，位置検出精度を高めることがある．

- 到来方向を用いる方式

到来方向 (DOA:Direction Of Arrival) 方式は，複数の基地局から到達する電波の到来方向を検知することで端末の位置を推定する．固定基地局の位置座標とその基地局からの発射された電波を端末が受信した角度を用いて三角測量により二次元の位置検出を行う．端末の位置を決定するための条件は2つある．1つ目は，3つの基地局の位置とその基地局から放射された電波の受信到来角度が分かるときであり，2つ目は，2つの基地局の位置とその基地局から放射された電波の受信到来角度と端末が向いている方向が分かるときである．いずれかの条件を満たすとき位置検出が可能となる．

1.3 先行研究とシステム

1.2 節で述べた位置検出方式を用いて，携帯電話やスマートフォン，ネットワーク等の携帯端末や RFID (Radio Frequency Identification) や ZigBee 等の位置情報の取得が可能な端末の位置を特定するためのサービスがベンチャーを含めた様々な企業から提供されており [21]-[29][37]，大学や研究所等でも位置検出精度の向上のために，様々な研究がなされている [38]-[60]．

1.3.1 従来の位置検出システム

- Global Positioning System

屋外での位置検出システムでは，GPS が最もよく知られている．GPS で用いられる衛星は6つの軌道にそれぞれ4機配置され，24機で地球全体をカバーしている．それぞれの衛星から送信される電波に載せられているデータは，衛星の軌道情報や衛星の時計の補正係数等である．地上にあるGPS衛星からの電波受信機は，4つ以上の衛星から電波を受けた時に位置検出が可能となる．3つではなく，4つ以上の衛星を必要とする理由は，電波受信機が正確な時計を持たずとも位置検出

を可能とするためである．電波受信機が正確な時計を持たないため，3つの衛星からの電波を受信しても受信時刻を判定できない．そこで4つめの衛星から時間情報を受け取り他の衛星との時間を同期させることで，正確な時間情報を得て受信時刻を確定する．そのため4つの衛星が必要である．位置検出誤差は約10m程度である．GPSを用いた方式は，他にDGPS (Differential GPS) やRTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) がある．DGPSでは位置が正確に分かっている定点に基準局を設置する．基準局から各衛星までの距離は正確に求められており，基準局にてGPSで求めた距離と基準局ごとに決められた距離に差が生じるのでこの差分(距離補正值)を通信回線を通じて電波受信機に知らせる事で，電波受信機は測定した擬似距離に補正值を適用して，より正確な位置を求める事ができる．位置検出誤差は数m程度である．GPSやDGPSは，搬送波に載せられたコードの到着時刻の測定によって位置検出を行っていたが，RTK-GPSは搬送波の位相を測定する事でcmレベルの高精度検出が可能となる．RTK-GPSはDGPSと同様に基準局を設け，電波受信機で同時に各衛星からの搬送波を連続的に観測し，搬送波の位相積算値を測定する．基準局から送られる値から位相差を求める事で位置を検出する．位相積算値が連続的に観測されている間は，位置検出が可能である．位置検出誤差は数cm程度である．

- GPS以外の位置検出システム

GPS以外の位置検出システムでは，文献[28][29][37][61]-[63]等が知られている．文献[28][29]は5台のアクセスポイントで構成され，受信端末から放射された電波を各アクセスポイントで受信したときの，電波の到着時刻の差分を用いて位置検出を行う．基地局は1台のMasterアクセスポイントと4台のSlaveアクセスポイントに分けられ，Masterアクセスポイントはアクセスポイント間の時計誤差を測定・補正する．位置検出誤差は1~3mである．文献[37]は，あらかじめ位置検出領域内でのRSSIを測定しキャリブレーションを行う．受信機で得られたRSSIを，キャリブレーションによって作られたPositioning Modelと照らし合わせることで位置検出を行う．位置検出誤差は1~5mである．文献[61]-[63]は，赤外線を用いて屋内における人や物の位置を高精度に特定・管理する．天井に設置したID発信機が位置IDを赤外線信号で発信し，ID発信機の下に来たID受信機付きモバイル

端末がその信号を受信することで位置を特定，モバイル端末が位置 ID を無線 LAN 経由で位置管理サーバに送信することでモバイル端末の位置を高精度に特定・管理する．赤外線信号を受信できる領域を半径 0.7m ~ 2.5m の円状にすることで，高精度な位置検出を実現している．

1.3.2 従来の位置検出に関する研究

- 屋外での位置検出に関する研究

GPS 機能を搭載することによる端末コストや消費電力の増加を回避するためであったり，ビルの谷間や高架下など見通し可能な GPS 衛星の数の確保が困難な場所でも位置検出を可能とするために，GPS を用いない位置検出方式に関する研究が行われている．文献 [38] では，携帯電話等のセルラーシステムを想定した基地局と受信端末間における通信の遅延プロファイルを指数分布と仮定し，TDOA による最尤推定の位置検出アルゴリズムの定式化を行っている．シミュレーションにより，移動端末の位置を 67%以上の確率で半径 100m 以内に存在することを報告するという連邦通信委員会 (FCC:Federal Communications Commission) の基準を Urban , Suburban , Rural 環境下で達成している．

- 屋内での位置検出に関する研究

屋内での位置検出に限ると，文献 [40] では，IEEE802.15.4 を用いたセンサーネットワークにおいて，実際の環境下で無線伝搬特性の統計モデル化を行い，得られた確率モデルを用いて RSSI による最尤推定法で受信端末の位置を推定している．実験では，基地局である固定ノードを 1.8m 間隔で設置したオフィス環境で人物の位置管理に実用可能となる約 1m の推定精度を実現している．文献 [43] では，UWB-IR (Ultra WideBand-Impulse Radio) 信号を用いた位置検出を行い，22m 四方の正方形領域の隅に基地局を設置して領域内で行った位置検出実験により検出誤差 30cm を達成している．文献 [44] では，屋上等の屋外で受信した GPS 信号を衛星からの GPS 信号が直接届かない地下街等の屋内へ再放射するシステム (Pseudolite) を提案し，GPS 信号の届かない遮蔽空間での GPS 利用を可能としている．実験では，飲食店街の通路に 20m 以下の間隔で 25 台の GPS 信号の再放射アンテナを設置し，位置検出を行っている．位置検出誤差は約 10m であった．

1.3.3 地下街における位置検出の問題

今まで位置検出を行う様々なシステムが開発され、検出方式についても研究が今でも行われている。屋外の従来システムはGPSが、基地局を必要とせず高精度な位置検出であるため一般的であり、研究・開発はGPSが使えない場所・空間やGPSが使えない端末が主な対象である。一方、屋内を対象とした位置検出システムや位置検出方式は様々なものが研究・開発されている。しかしながら、文献[40][43][44]で示されたように、これらのシステムでは基地局との距離が20m程度以内の場所を基地局の通信可能範囲としており、また文献[68]では、基地局との距離が約10mをこえると通信が不可能となるなど、通信可能範囲が狭いという問題がある。また、屋内の位置検出では、三点測位により位置検出を行うことが多いが、三点測位の実現のためには端末と通信可能な基地局が3つ以上必要であり、基地局からの通信可能範囲の狭さと合わせると、地下街通路等の広い場所で位置検出を行う場合は、密に基地局を配置する必要がある。文献[62]ではWLANを用いて位置検出を行っており、複数の基地局を配置する事によってフロア全体の約95%のエリアで通信可能であるが、位置検出精度が5m以下となるエリアはフロア全体の約16%である。

近年、建物内や地下街の複雑化により、消防活動時の消防隊員の位置把握が重要である。消防活動時は、隊員の誘導や安全確保のために、階段やドア、消火栓等の位置特定に対応した検出精度が必要であり、その大きさは誤差1m程度である。しかしながら、地下街等での位置検出には大きなハードルがある。例えば200mの地下街の通路等で通路全てが位置検出範囲となるように機器を設置する場合、従来の三点測位による位置検出では、基地局が40個程度必要であった。さらに基地局は一般的に電源を必要とするが、災害時はこのように多数設置された全ての基地局に対して電源が必ず確保できるとは限らないため、基地局数の少ない位置検出方法の開発が望まれている。

1.4 漏えい同軸ケーブル

火災の予防や鎮圧、さらに国民の生命や財産を火災から保護し、社会公共の福祉の増進のために消防法[64]が法律として定められている。消防法は、火災等の災害発生時に避難活動、救援活動を円滑に行うために隊員同士が連絡できるように、延

べ面積が $1000m^2$ を超える建物や地下街等では、無線通信補助設備の設置が義務付けられている [65][66]。無線通信補助設備は、「消防隊相互の無線連絡が容易に行われるように設けるもの」と定められており、無線通信補助設備として漏えい同軸ケーブルが用いられることが多い。漏えい同軸ケーブルは、「給電線」と「アンテナ」を兼ねたアンテナであり、ケーブルに沿ってスロットと呼ばれる電波を放射する孔が設けられており、一種のアレーアンテナともいえる。スロットがケーブルに沿ってジグザグ状に設けられているため、スロットからは垂直偏波と水平偏波の両方の電波が放射されるため [67]、受信機のアンテナの特性が垂直偏波、水平偏波のどちらの場合でも受信できる。

ケーブルに設けられたそれぞれのスロットから電波が放射されるため、ケーブルのスロットを基地局と見立てることで、基地局がケーブルに沿って配置されたケーブルと見なすことができ、1つの基地局で広範囲の通信が可能となる。文献 [68] に示されているように、洞道に等しい送信電力が入力された漏えい同軸ケーブルとオムニアンテナを設置したところ、オムニアンテナを用いた場合の通信可能範囲は 10m 程度であったのに対して、漏えい同軸ケーブルを用いた場合は、給電点 (基地局の役割) から 400m 離れた LCX 直下においても通信が可能であった。つまり、漏えい同軸ケーブルは給電点を 1つ設置するだけで、地下街通路、オフィヒスビルの廊下等に沿った 400m の範囲を通信可能範囲とすることができる。漏えい同軸ケーブルを用いることで、通信可能範囲が広くなり、移動中の場合ハンドオーバー回数の削減が可能となる。実際、超高速な新幹線の線路脇に設置する [69][70] ことで、新幹線内での通信環境の整備に役立っている。また、地下街等での防災無線としても用いられる。漏えい同軸ケーブルは、1つの基地局で広範囲に通信可能範囲を形成しながら、電源は給電点にのみで十分である。そのため、非常時に停電が発生しても、給電点に非常用電源を確保するだけで広範囲の無線通信環境を確保可能であり、地下街等での防災無線用のインフラとして広く利用されている。通信可能周波数帯域が 0.8GHz ~ 2.6GHz と広帯域である漏えい同軸ケーブルが開発され [71]、携帯電話、PHS、無線 LAN など様々な通信を行うことが可能となってきて、また、漏えい同軸ケーブルは、外皮導体上にスロットを設けるために直径が 3cm ほど必要であったが、直径が 1cm しかない超細径のケーブルが開発されており [72]、そのケーブルを用いることで取り回しが容易になり、今後様々な場所で設置が進むと考

えられる。

1.5 研究目的

地下街等での位置検出には、大量の基地局が必要であることと基地局ごとに電源を必要とすることが課題であった。

そこで、本論文では、広範囲に通信可能範囲を持ち、給電点のみに電源を必要とする、漏えい同軸ケーブルを用いた位置検出方式を提案することを目的とする。提案方式は二次元平面内で端末の位置を推定する。詳細は2章で述べるが、漏えい同軸ケーブルは地下街や屋内などの同一平面内への設置が中心であり、必要な位置情報は主として二次元位置情報であり、高さはあまり重要ではない。そのため本論文が提案する位置検出方式は、二次元位置検出を主として検討している。ただし、検討を加えていないが、漏えい同軸ケーブルの三次元配置により、本検討結果を適用して三次元位置検出が可能である。本論文は、漏えい同軸ケーブルに信号を入力する給電点(基地局の役割)一つのみで漏えい同軸ケーブルに沿った広範囲の位置検出方式を提案する。

1.6 論文構成

本論文は以下の4章で構成される。

第2章では、最初に漏えい同軸ケーブルの構造と指向特性について述べ、二次元位置検出方式として、電波の到着時刻(TOA:Time of Arrival)と受信信号の強度(RSSI:Received Signal Strength Indicator)を用いる方式を提案する。提案方式における電波の到着時刻と信号強度を実験により測定し、位置検出原理を実証すると共に、提案する位置検出方式の誤差を求め評価する。更に、漏えい同軸ケーブルの終端で信号を反射させることで、第一波と第二波の2波を漏えい同軸ケーブルから放射させ、生じた2つの伝搬経路のそれぞれの到着時刻を用いて二次元位置検出を行う方式を提案し、実験によって位置検出原理を実証すると共に、位置検出誤差を求め評価する。

第3章は、送信機と受信機間の時間同期を不要とする、複数の電波の到着時刻差(TDOA:Time Difference Of Arrival)を用いる方式を提案する。漏えい同軸ケー

ブルを屈曲配置することによって、電波の伝搬経路の数を4つに増加させ、4つのTOAから選択した3つのTDOAを用いて、位置検出を可能としている。本方式の位置検出可能領域を導出すると共に、実験により位置検出原理を実証し、位置検出誤差を求め評価する。

第4章は、二方向に指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用いて、漏えい同軸ケーブルを進行して行く2波と終端で反射してくる2波を空間に放射させ、これら4波のTDOAを用いて二次元位置検出を行う方式を提案する。まず、漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件を示した後、FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain method) を用いたシミュレーションにより給電点と受信アンテナ間の4波の伝搬路応答を導出する。次に4波の到着時刻差から端末の二次元位置検出を行う位置検出原理について説明する。最後にシミュレーションによって位置検出誤差を求めると共に、位置検出可能領域の面積を評価する。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果の総括を行う。

第2章 終端反射を用いた到着時刻位置検出方式

2.1 序言

本章では、最初に漏えい同軸ケーブルの構造と指向特性について述べ、二次元位置検出方式として、電波の到着時刻 (TOA:Time of Arrival) と受信信号の強度 (RSSI:Received Signal Strength Indicator) を用いる方式を提案する。提案方式における電波の到着時刻と信号強度を実験により測定し、位置検出原理を実証すると共に、提案する位置検出方式の誤差を求め評価する。

更に、漏えい同軸ケーブルの終端で信号を反射させることで、第一波と第二波の2波を漏えい同軸ケーブルから放射させ、生じた2つの伝搬経路のそれぞれの到着時刻を用いて二次元位置検出を行う方式を提案し、実験によって位置検出原理を実証すると共に、位置検出誤差を求め評価する。

2.2 漏えい同軸ケーブル

2.2.1 構造

図 2.1 に示すように、漏えい同軸ケーブルは外側から被膜、外部導体、絶縁体で構成され、中心の軸が内部導体となる [67][73]。また、架空配線のために支持線が付属していることがある。

同軸ケーブルの内部導体と外部導体に信号電圧を加えると、それぞれの導体に電流が流れる。外部導体にスロットと呼ばれる孔を周期的に設けることで、電流の分布状態が変化し、ケーブル内を伝送する信号がスロットから電波となって放射される。

2.2.2 放射特性

漏えい同軸ケーブルは波源が周期的に配置されたアレーアンテナと見なすことができる。アレーアンテナでは各アンテナから放射された電波の干渉により強め合いや弱め合いが発生するが、漏えい同軸ケーブルでも同じように強め合いや弱め合いが発生する。

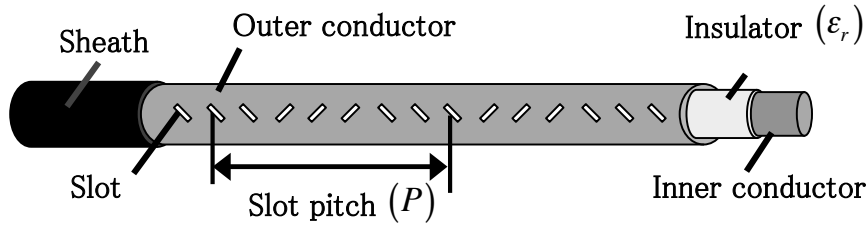


図 2.1: 漏えい同軸ケーブルの構造

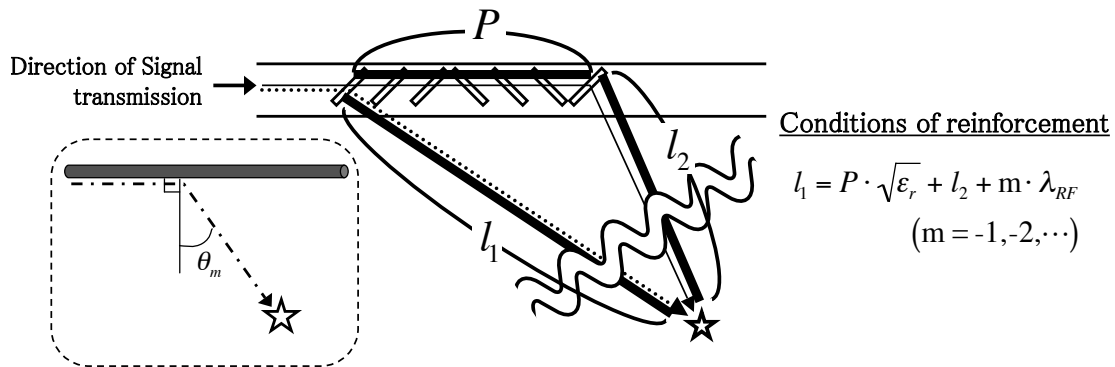


図 2.2: 電波が強め合う条件

図 2.2 にスロット周期 $P[\text{m}]$ 離れた 2 つのスロットから放射され受信端末で受信された 2 波の電波が強め合う条件を示す. P 離れたスロットを経て受信端末で受信されたそれぞれの電波の到着時刻の差が電波の周期の整数倍であるとき, それぞれのスロットから放射され受信端末で受信された電波は同位相となり強め合う. 強め合う条件を以下に示す.

$$l_1 = P\sqrt{\epsilon_r} + l_2 + m \cdot \lambda_{RF}. \quad (m = -1, -2, -3, \dots) \quad (2.1)$$

ただし, ϵ_r は絶縁体の比誘電率, $\lambda_{RF}[\text{m}]$ は空間中の電波の波長である.

なお, スロットと受信端末の間の距離 $l_1[\text{m}]$, $l_2[\text{m}]$ がスロット周期 P よりも十分長い場合, それぞれのスロットから受信端末までの伝搬経路 (l_1, l_2 の部分) は平行と見なすことができる. このとき, 図 2.2 に示すように, 漏えい同軸ケーブルへの垂線と伝搬経路の直線がなす角度を $\theta_m[\text{rad}]$ とすると, 受信端末で受信されるそれ

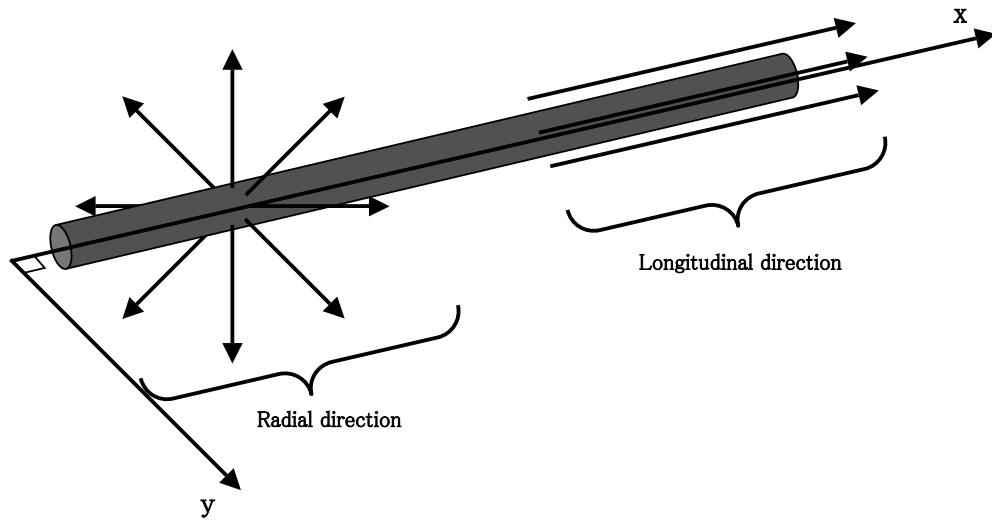


図 2.3: ラジアル方向と長手方向の定義

それぞれの電波が同位相となる条件は以下ようになる。

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\sqrt{\epsilon_r} + \frac{m\lambda_{RF}}{P} \right). \quad (2.2)$$

$(m = -1, -2, -3, \dots)$

P 離れたスロットから放射された電波の位相差が電波の周期の m 倍の場合の、強め合った電波を m 次モードの放射波と呼ぶ。 $m = -1$ のとき、電波の一周期分の差のみとなるため、電波の強め合いが最大となる。このときの角度 θ_{-1} は最大放射指向角度と呼ばれている。

なお、本論文では、図 2.3 のように、漏えい同軸ケーブルに対して垂直な方向をラジアル方向、漏えい同軸ケーブルに対して平行な方向を長手方向と記述する。また、本論文の提案方式は、主に対象が屋内であるため、二次元位置の推定が重要で、高さの推定は重要ではない。そのため、位置検出は二次元平面上で行い、 x 軸と y 軸が垂直に交わる平面とし、この xy 平面上に漏えい同軸ケーブルと受信端末が存在するものとする。

2.3 本論文で提案する位置検出方式の特徴

本論文で提案する位置検出方法は漏えい同軸ケーブルを用いたものである。もちろん、漏えい同軸ケーブルを用いた位置検出方式は既に存在し、文献 [45]-[48] のように従来の位置検出方式は、2本の漏えい同軸ケーブルを設置し、漏えい同軸ケーブル間に電波を遮るものが生じた時に、電界の変化からその障害物の位置を検出するという検出方式の研究である。このような従来方式は、新幹線線路内への人の侵入検知などに応用されている [74]。しかしながら、この方式は、携帯端末や RFID や ZigBee 等の位置情報の取得が可能な端末の位置を検出するためのものではなく、漏えい同軸ケーブル間の電界変動を元に侵入した人や物を検知するためのシステムである。従来の位置検出方式は侵入物の位置を検知する方式であるが、本論文で提案する位置検出方式は受信端末の位置を検出する方式であり、この検出対象の違いが従来方式と提案方式の違いである。

さらに、提案方式は漏えい同軸ケーブルを用いるため、位置検出の適用領域は既に漏えい同軸ケーブルが設置されたり、設置が容易な室内である。室内では、高さの情報が不要で二次元位置検出で十分なアプリケーションがほとんどである。そのため、本論文は漏えい同軸ケーブルの片側の二次元位置検出に焦点を絞って提案する。仮に、受信端末の高さは変わっても、室内では高さは高々1m程度の変化であるため二次元位置検出の誤差に影響しない。なぜなら、漏えい同軸ケーブルからはラジアル方向に全方位に同じ放射指向角度で放射されているので、端末の高さが上下に変わっても1m以内であるならば、到着時刻の変化は3nsec以内であるため、本提案原理には影響を与えない。

本論文で提案する位置検出方式は、電波の到着時刻を用いる。漏えい同軸ケーブルから放射される電波は、2.2.2節で述べたように、特定の方向に放射指向性を持つため、端末での受信電波の伝搬経路の特定が容易になる。提案方式では、電波の到着時刻を測定することによって伝搬経路の長さが求まり、これを複数組み合わせる事で位置検出を行う。

2.4 到着時刻と受信強度を用いた位置検出方式

本節では、二次元の位置検出を行うために、受信電波の到着時刻と受信強度を用いる位置検出方式を提案し、その検出原理について述べると共に、実験により測定した位置検出誤差を明らかにする。

2.4.1 到着時刻と受信強度を組み合わせる方式の原理

漏えい同軸ケーブルに入力された電波は放射されながら漏えい同軸ケーブル内を伝送されるため、入力端に近いスロットから順に電波の放射が起こる。図 2.4 に漏えい同軸ケーブルから放射指向角度 θ_{-1} の方向に放射される電波について到着時刻が等しくなる位置を結んだ線を示す。これを本論文では、等到着時刻線と呼ぶことにする。図中では最大電波が受信される放射指向角度方向 θ_{-1} の電波のみに注目している。図中のいずれかの線上に受信端末があるとき、その線上のどの地点でも受信する電波の到着時刻が同一であるため、二次元の位置検出はできない。

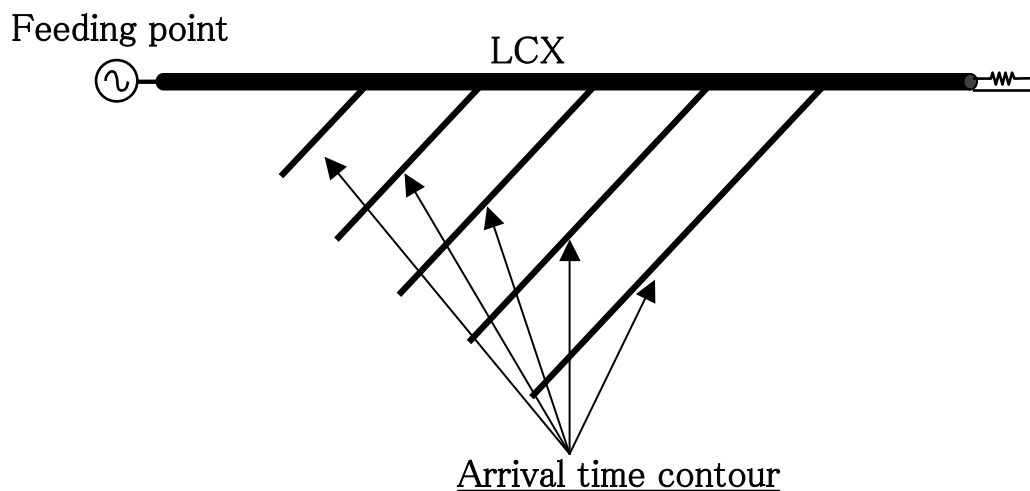


図 2.4: 電波の等到着時刻線

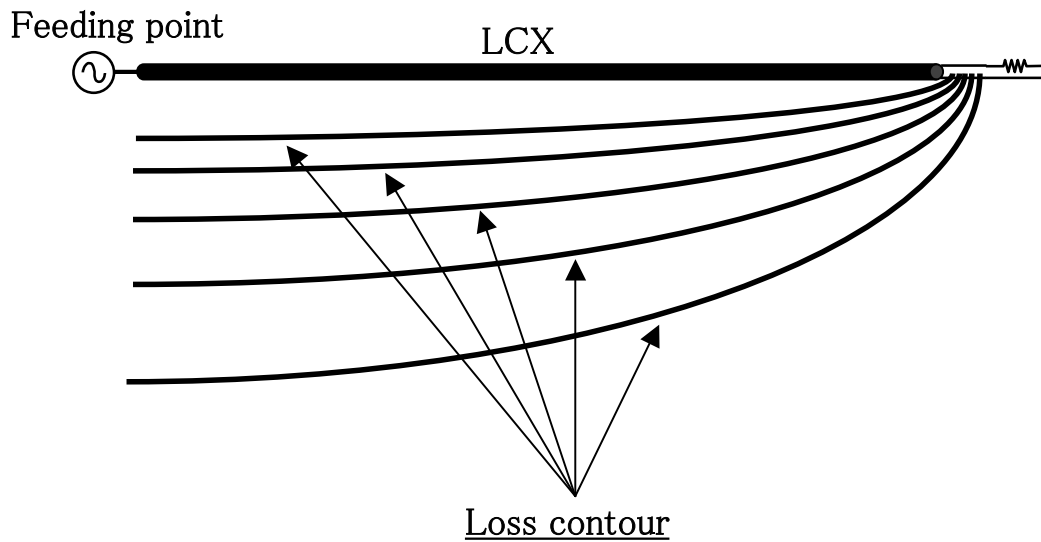


図 2.5: 電波の伝搬損失が等しい線

次に伝搬損失について述べる．ケーブル内の伝送損失に対して，ケーブルから放射された後の自由空間損失は大きい．

伝送損失と自由空間損失の合計である伝搬損失が等しい位置を結んだ線は図 2.5 のようになる．同様に，図中の線上のどの地点でも同一の損失となり二次元の位置検出はできない

そして，図 2.6 のように，図 2.4 と図 2.5 を重ね合わせることで得られる線の交点が端末の位置となる．

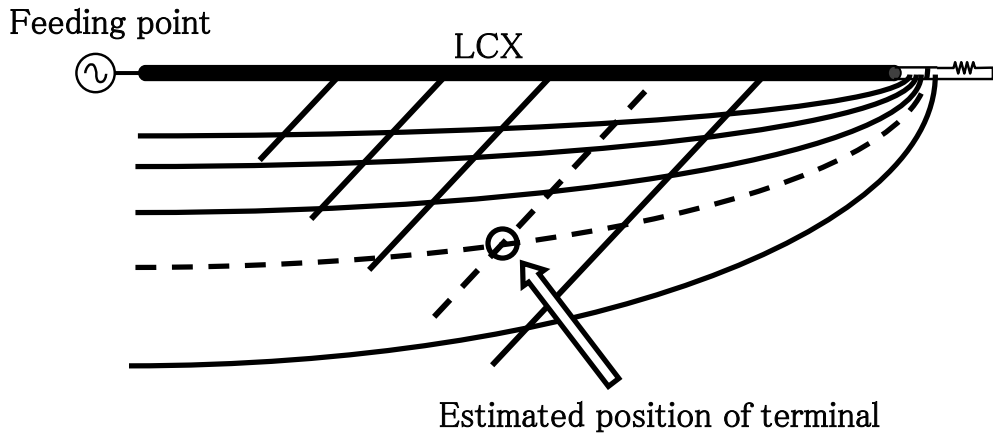


図 2.6: 等到着時刻線と伝搬損失が等しい線の交点

電波の到着時刻 (TOA) と信号受信強度 (RSSI) を組み合わせて位置を検出する原理を述べる．まず TOA に基づく到着時刻と受信端末の位置座標の関係式を導く．

図 2.7 に伝搬経路を示す．給電点から漏えい同軸ケーブルに入力された信号は，ケーブル内を伝送後，最大放射指向角度 θ_{-1} [rad] で放射される．空間に放射された信号は，受信端末で受信される．漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を A_1 [m] とすると，その伝搬時間 t_{a1-v} [sec] は，群速度 v [m/s] を用いて以下のように表せる．

$$t_{a1-v} = \frac{A_1}{v}. \quad (2.3)$$

v [m/s] は， ϵ_r ，空間中の伝搬速度 c [m/s] と以下の関係にある．

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (2.4)$$

空間中の伝搬距離を B_1 [m/s] とすると，その伝搬時間 t_{a1-c} [sec] は， c [m/s] を用いて以下のように表せる．

$$t_{a1-c} = \frac{B_1}{c}. \quad (2.5)$$

よって，到着時刻 t_{a1} [sec] は

$$t_{a1} = \frac{A_1}{v} + \frac{B_1}{c}, \quad (2.6)$$

となる．ここで， xy 平面上にて漏えい同軸ケーブルと受信端末の位置を以下のようにする．給電点の座標を $(0, 0)$ ，受信端末の位置座標を (X, Y) とし，長さ L [m]

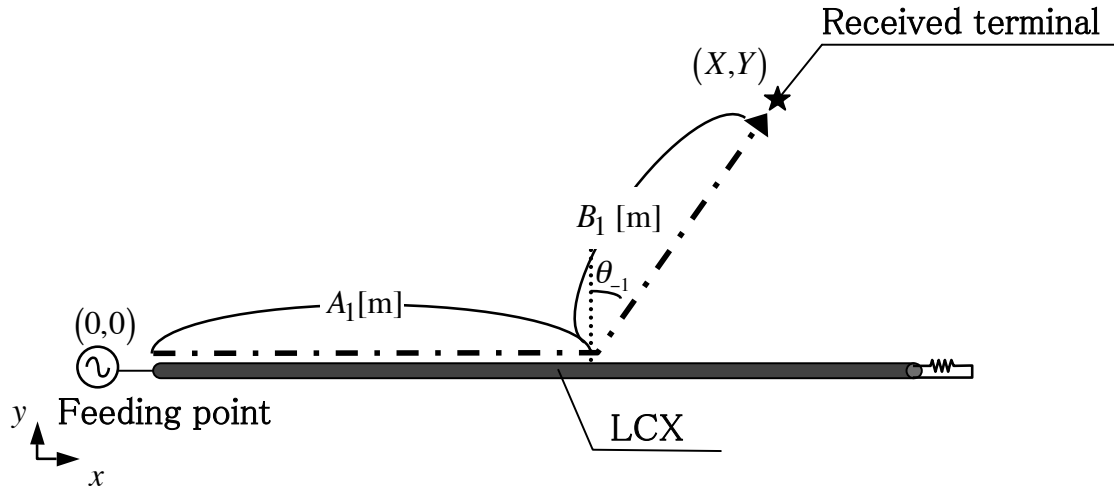


図 2.7: 伝搬経路

の漏えい同軸ケーブルが x の正方向に向かって設置されているとすると、図 2.7 の A_1, B_1 は X, Y, θ_{-1} を用いて以下のように表せる。

$$\begin{aligned} A_1 &= X - Y \tan \theta_{-1}, \\ B_1 &= \frac{Y}{\cos \theta_{-1}}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

よって、式 (2.6) は、以下のようになる。

$$t_{a1} = \frac{X - Y \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos \theta_{-1}}. \quad (2.8)$$

次に、RSSI に基づく伝搬損失と受信端末の位置座標の関係式を導く。漏えい同軸ケーブル内のある地点を流れる信号の信号強度と、そのある地点からラジアル方向に離れた地点の信号強度の差として得られる損失を結合損失という [67][75]。その結合損失を求める一般式があるので、その式を用いるため、図 2.8 のように漏えい同軸ケーブル内の伝送距離と空間伝搬距離に分けて考える。

伝搬損失は、漏えい同軸ケーブル内の伝送損失と空間伝搬損失の dB 値の和である。給電点と受信端末から漏えい同軸ケーブルへ向かう垂線の交点との距離を C_1 [m] とする。漏えい同軸ケーブル内の伝送損失 L_{c_v} [dB] は以下のように表せる。

$$L_{c_v} = \alpha C_1. \quad [\text{dB}] \quad (2.9)$$

ここで α [dB/m] は漏えい同軸ケーブルの 1m あたりの伝送損失である。

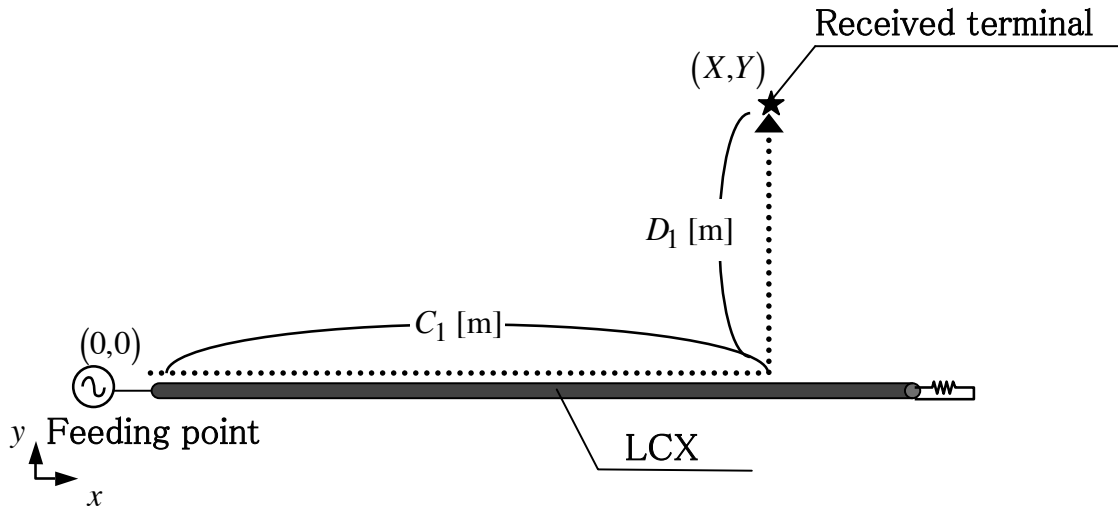


図 2.8: 伝搬損失

次に空間中の伝搬損失を考える．結合損失 ($Loss$ [dB]) は以下の式で与えられる [67][75] ．

$$Loss = 53.2 - 10 \log \left(\frac{\lambda_{RF}^2}{r} \right) - 10 \log \alpha_R. \text{ [dB]} \quad (2.10)$$

λ_{RF} は空間中の電波の波長である．ただし，漏えい同軸ケーブルの放射に伴う放射損失 α_R [dB/m] は， α [dB/m] とスロットが設けられていないと仮定した場合のケーブルの伝送損失 α_0 [dB/m] を用いて以下のように表せる．

$$\alpha_R = \alpha - \alpha_0. \text{ [dB/m]} \quad (2.11)$$

受信端末から漏えい同軸ケーブルまでの距離を D_1 [m] とすると，空間伝搬損失 Lc_c [dB] は式 (2.10) より，以下のように表せる．

$$Lc_c = 53.2 - 10 \log \left(\frac{\lambda_{RF}^2}{D_1} \right) - 10 \log \alpha_R. \text{ [dB]} \quad (2.12)$$

よって，漏えい同軸ケーブル内を伝送することによって生じる伝送損失と空間中を伝搬することによって生じる伝搬損失を合わせた総伝搬損失 Lc [dB] は以下のようになる．

$$\begin{aligned} Lc &= Lc_v + Lc_c \\ &= \alpha C_1 + 53.2 - 10 \log \left(\frac{\lambda_{RF}^2}{D_1} \right) - 10 \log \alpha_R. \text{ [dB]} \end{aligned} \quad (2.13)$$

図2.8の C_1, D_1 は X, Y を用いると以下のように表すことができる.

$$\begin{aligned} C_1 &= X, \\ D_1 &= Y. \end{aligned} \quad (2.14)$$

よって, 式(2.13)の総伝搬損失 L_c は, 以下のようになる.

$$L_c = \alpha X + 53.2 - 10 \log \left(\frac{\lambda_{RF}^2}{Y} \right) - 10 \log \alpha_R. \quad (2.15)$$

位置座標 (X, Y) で受信した電波の到着時刻 t_{a1} と伝搬損失 L_c により決定される受信強度を用いて位置検出を行う. (X, Y) の推定座標を (\tilde{X}, \tilde{Y}) とすると, 式(2.8), 式(2.15)を \tilde{X}, \tilde{Y} について解くことで (\tilde{X}, \tilde{Y}) の推定式が以下のように求まる.

$$\tilde{X} = t_{a1} \cdot v + \tilde{Y} \left(\tan \theta - \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{v}{c} \right), \quad (2.16)$$

$$\tilde{Y} = 10 \left(\frac{L_c - \alpha \tilde{X} - 53.2 + 10 \log (\lambda_{RF}^2 \cdot \alpha_R)}{10} \right). \quad (2.17)$$

2.4.2 原理確認実験と誤差評価

実際に提案方式の原理確認実験を行い，提案方式である TOA と RSSI を用いた位置検出方式が，実際に位置検出が行えること確認することを通じて原理の実証をすると共に，位置検出誤差を求め評価する．

2.4.2.1 実験構成

表 2.1: 実験諸元

ネットワーク アナライザ の設定	中心周波数	2.4 [GHz]
	周波数帯域幅	1.0 [GHz]
	測定回数	16[回]
漏えい同軸 ケーブル	伝送損失@2.4GHz(終端時)	7.8 [dB/100m]
	標準結合損失@2.4GHz(終端時)	64.3 [dB]
	VSWR@2.4GHz	≤ 1.25
	スロット周期 (P)	0.24 [m]
	サブスロット間隔	0.027 [m]
	スロットの配置	三連ジグザグ配置
	最大放射指向角度 (θ_{-1})@2.4GHz	0.681 [rad] (39°)
	絶縁体の比誘電率 (ϵ_r)	1.29
	全長	5 [m]
受信 アンテナ	種類	オムニアンテナ
	周波数帯域	1.9 ~ 2.4 [GHz]
	VSWR@2.4GHz	≤ 1.30
	絶対利得@2.4GHz	2.6 [dBi]
床からの高さ		1.4 [m]

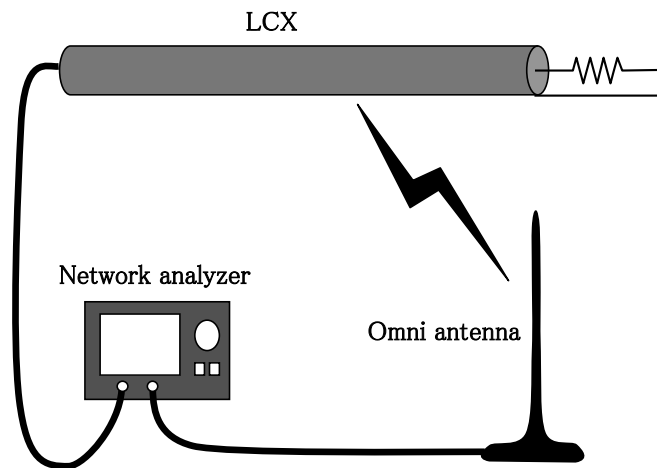


図 2.9: 実験構成

表 2.1 に実験で用いるネットワークアナライザや漏えい同軸ケーブル、オムニアナテナ等の実験諸元を、図 2.9 に実験構成を示す。標準結合損失とは、漏えい同軸ケーブルからの距離が 1.5m の場合の結合損失の値であり、漏えい同軸ケーブルが持つ放射量の比較を行うときの目安として使われている。本実験では、全長 5m の漏えい同軸ケーブル、長さ 17.5cm のオムニアナテナ、ネットワークアナライザ、各機器を接続するための同軸ケーブルで構成される。また、漏えい同軸ケーブルとオムニアナテナは木製の棚やカメラ用三脚を用いて固定し、床からの高さは 1.4m である。

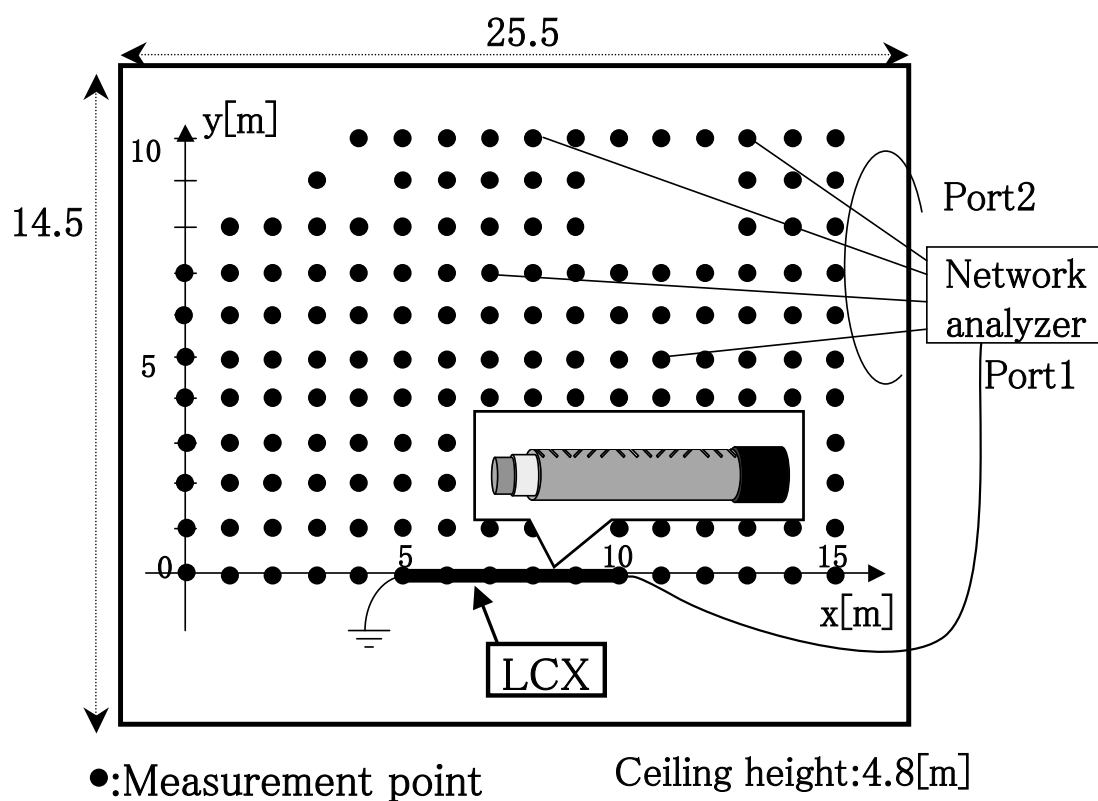


図 2.10: 実験環境

図 2.10 に実験環境を示す。図 2.10 のように xy 座標を設定したとき、部屋の大きさは、 x 方向が 25.5m、 y 方向が 14.5m、天井の高さが 4.8m である。漏えい同軸ケーブルは給電点と終端がそれぞれ (10, 0) と (5, 0) に位置するように設置し、黒丸は測定位置を表し、その間隔は 1m である。図 2.11 に実験風景を示す。



図 2.11: 実験風景

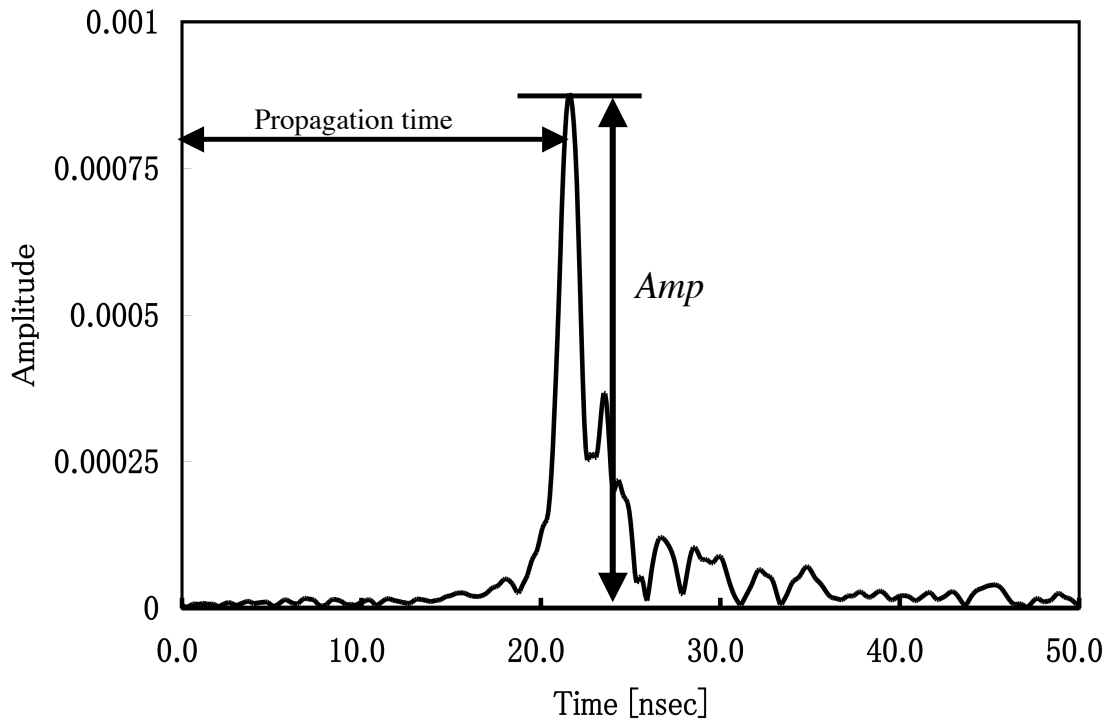


図 2.12: インパルス応答の測定例

2.4.2.2 位置検出と検出誤差

ネットワークアナライザは、給電点とオムニアンテナ間の周波数特性を測定する。これを逆フーリエ変換することでインパルス応答が得られる。図 2.12 に周波数掃引範囲 10kHz で測定した場合のインパルス応答の測定例を示す。受信信号が最も強くなった時刻は、給電点から漏えい同軸ケーブルに入力された信号が漏えい同軸ケーブル内と空間中を伝搬した後、オムニアンテナで受信される到着時刻 t_{a1} である。受信信号が最も強くなった時刻の縦軸の値を Amp とすると総伝搬損失 L_c は、以下のように求まる。

$$L_c = 20 \log_{10} Amp. \text{ [dB]} \quad (2.18)$$

各測定点にて、漏えい同軸ケーブルとオムニアンテナ間のインパルス応答を測定し、 t_{a1} と L_c を求めた後、式 (2.16)、式 (2.17) に代入し、推定位置 (\tilde{X}, \tilde{Y}) を推定する。

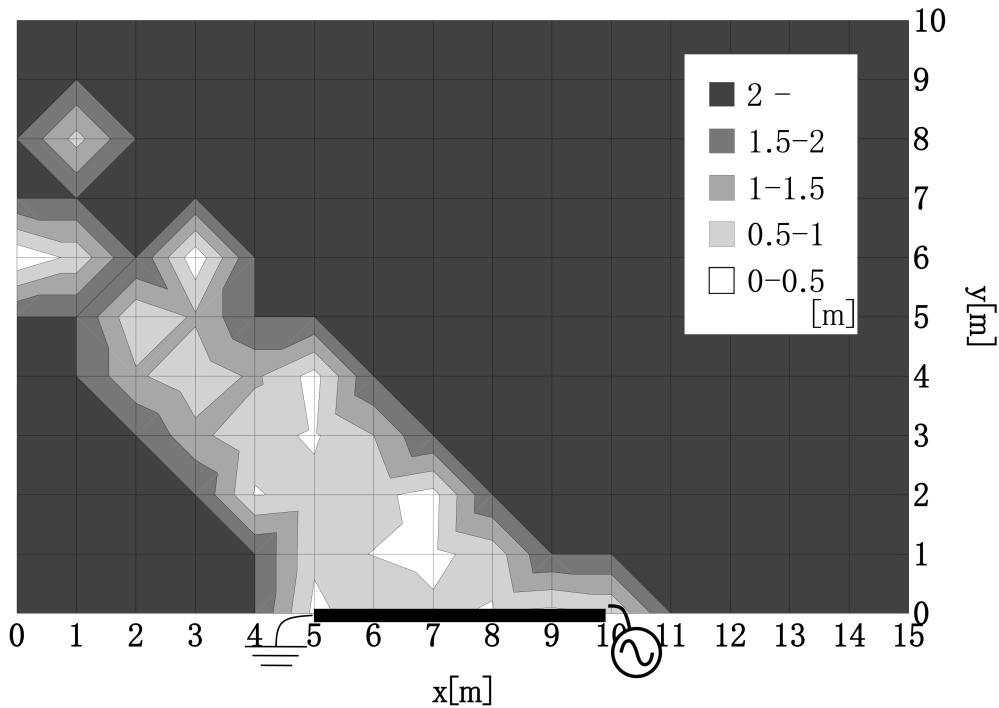


図 2.13: 位置検出誤差の分布

ここで、推定位置 (\tilde{X}, \tilde{Y}) と測定した真の位置 (X, Y) の距離を誤差 e は、

$$e = \sqrt{(\tilde{X} - X)^2 + (\tilde{Y} - Y)^2}, \quad (2.19)$$

で与えられる。図 2.13 に、位置検出誤差の分布測定結果を示す。測定点の間隔は 1m であるため、測定点間は線形補間により誤差を求めた。誤差が 1.0m 以下である地点を位置検出が可能である地点とすると、電波の放射指向角度 θ_{-1} の方向に位置検出が可能であることが分かる。漏えい同軸ケーブルから距離が離れるほどインパルス応答が小さくなり、到着時刻を誤認する可能性が高まるため、受信信号に対する雑音の影響も大きくなる。漏えい同軸ケーブルからの距離が 7m 以上では、位置検出はほぼ不可能である。

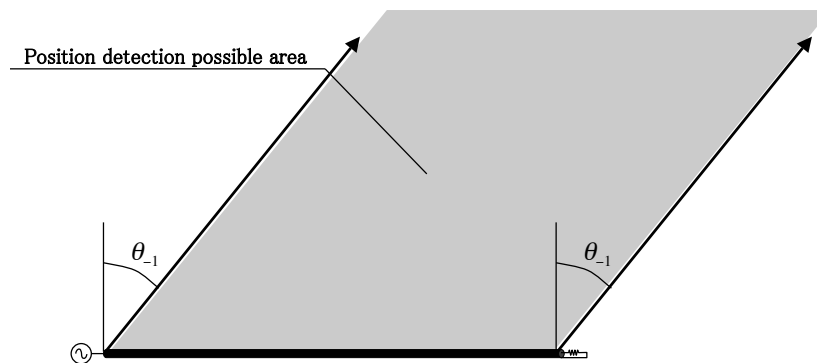


図 2.14: 位置検出可能領域の定義

漏えい同軸ケーブルから放射される電波は，放射指向角度 θ_{-1} を有する．すなわち，漏えい同軸ケーブルから見て放射指向角度 θ_{-1} の方向に強め合いを引き起こす．図 2.14 のこの指向角度 θ_{-1} で決まる灰色の領域では端末は強い電波を受信するわけである．本論文では，高電力で受信される可能性が高く，またマルチパスが存在する室内環境においても最短で到着する放射指向角度方向と放射された電波の到着時刻を用いて位置検出を行うため，この電波が届くことが前提となる．そこでこの灰色の領域を位置検出可能領域と定義し，その領域内での誤差の累積分布を求めた．図 2.15 に誤差の累積分布のグラフを示す．灰色の領域は指向角度 θ_{-1} に無限に伸びているが，電波の伝搬距離が伸びることで減衰が大きくなり電波のパルス検出が不可能となった場合，位置検出は不可能となる．そのため，位置検出可能領域を区切る必要がある．実験では，図 2.10 の灰色の領域のなかで測定点が存在する場所のみを位置検出可能領域とした．そのため，漏えい同軸ケーブルからの距離が長い $y = 7$ など，電波の減衰が大きいため位置検出が不可能であった位置も位置検出可能領域に含まれている．

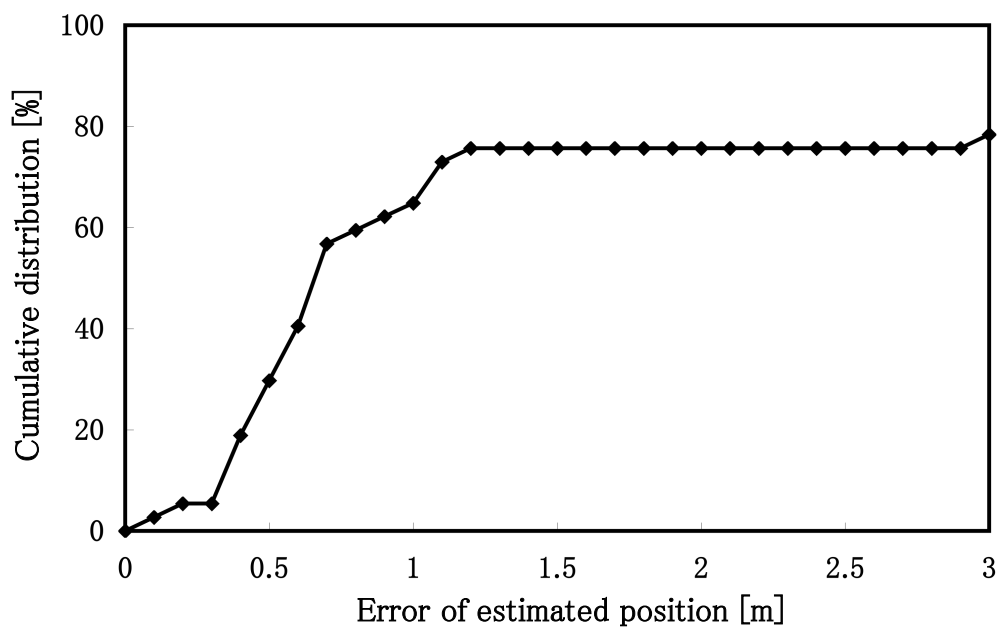


図 2.15: 誤差の累積分布

2.5 終端反射を用いた到着時刻位置検出方式

漏えい同軸ケーブルの終端で信号を反射させることで、漏えい同軸ケーブルから2波を放射させ、それらの到着時刻を用いて端末の位置を検出する方式を提案する。2.4節で提案した位置検出方式は、電波の受信強度を用いた方式であるが、電波の受信強度のフェージング変動は誤差を招くため、フェージングの影響を受け難い到着時刻のみを用いて検出を可能とする。

本論文では、以降、終端における反射を経る前に漏えい同軸ケーブルから放射された電波を第一波、終端における反射を経た後に漏えい同軸ケーブルから放射された電波を第二波と呼ぶ。

2.5.1 TOA 位置検出方式の原理

以下に、終端での信号の反射を利用することでTOAのみで位置を検出する方法を示す。終端を開放することで電波を反射させている。図2.16に第一波の等到着時刻線を、図2.17に第二波の等到着時刻線を示す。図中のいずれか線上に受信端末があるとき、その線上のどの地点でも受信する電波の到着時刻が同一であるため、二次元の位置検出はできない。

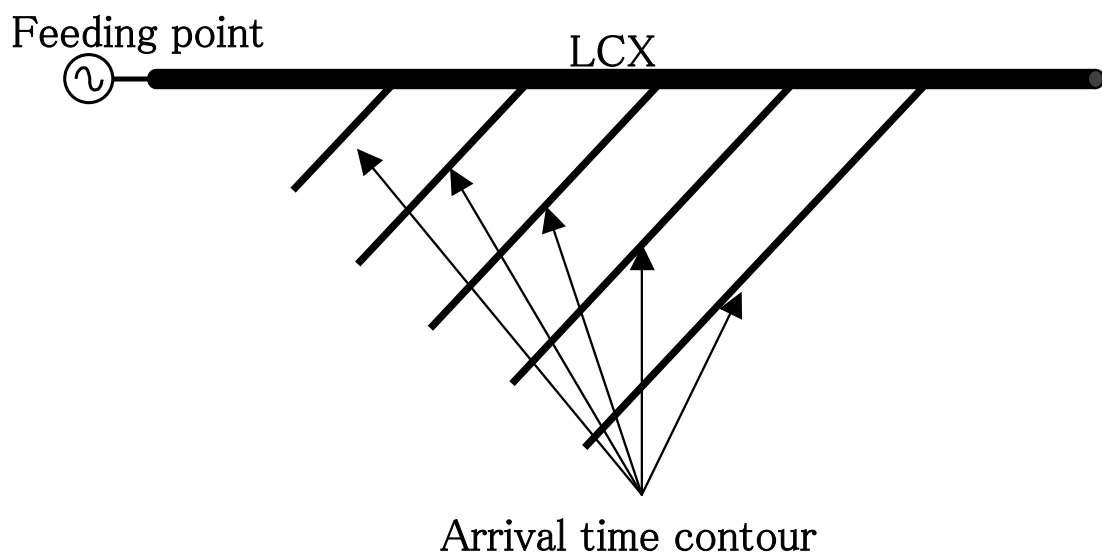


図 2.16: 第一波の等到着時刻線

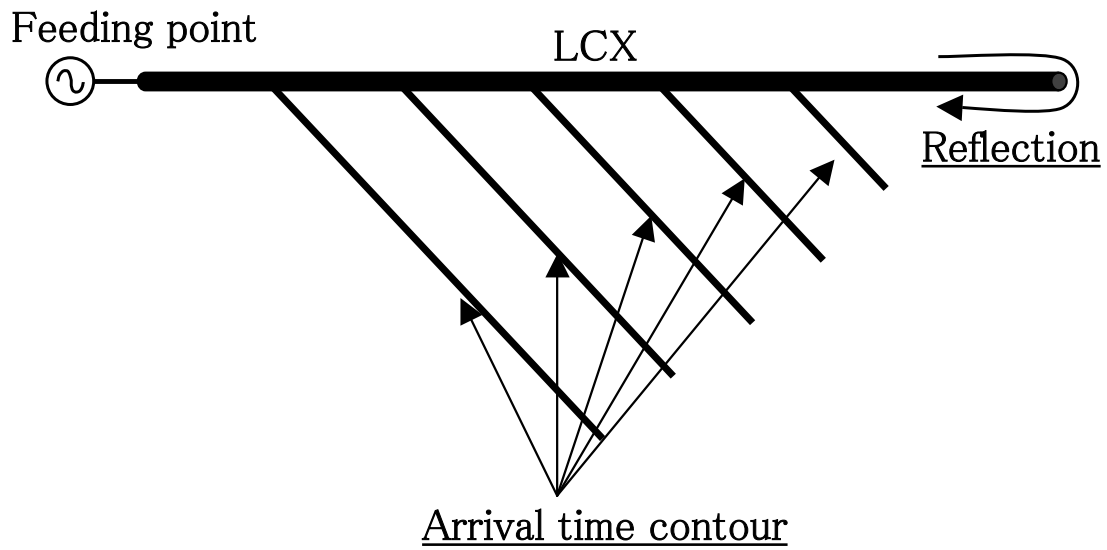


図 2.17: 第二波の等到着時刻線

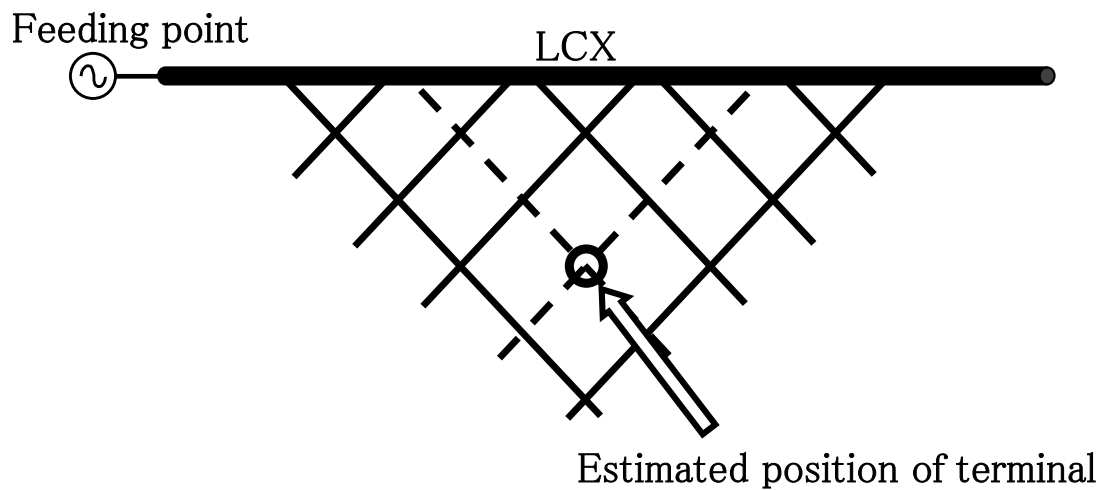


図 2.18: 等到着時刻線の交点

そこで、図 2.18 のように、図 2.16 と図 2.17 を重ね合わせることで得られる線の交点が端末の位置となる。

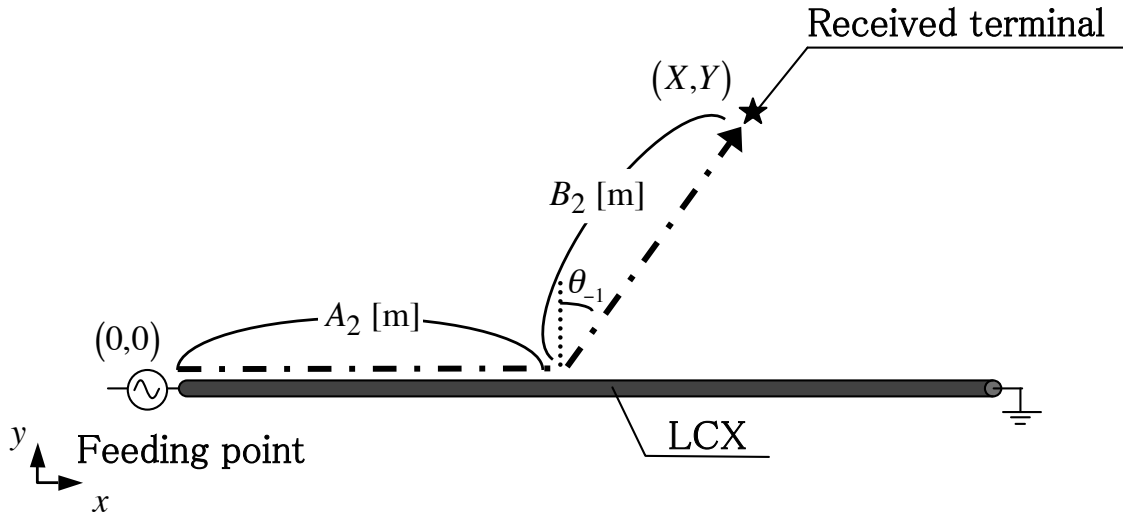


図 2.19: 第一波の伝搬経路

以下に第一波と第二波の TOA を用いる方法を示す．

まず第一波に基づく到着時刻と受信端末の位置座標の関係式を導く．図 2.19 に伝搬経路を示す．給電点から入力された信号は，漏えい同軸ケーブル内を伝送後，最大放射指向角度 θ_{-1} で放射される．空間に放射された信号は，受信端末で受信される．漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を A_2 [m] とすると，その伝搬時間 t_{b1-v} [sec] は， v [m/s] を用いて以下のように表せる．

$$t_{b1-v} = \frac{A_2}{v}. \quad (2.20)$$

空間伝搬距離を B_2 [m/s] とすると，空間伝搬時間 t_{b1-c} [sec] は， c [m/s] を用いて以下のように表せる．

$$t_{b1-c} = \frac{B_2}{c}. \quad (2.21)$$

よって，到着時刻 t_{b1} [sec] は以下のように表せる．

$$t_{b1} = \frac{A_2}{v} + \frac{B_2}{c}. \quad (2.22)$$

xy 平面上にて漏えい同軸ケーブルと受信端末の位置を以下のようにする．給電点の位置座標を $(0, 0)$ ，受信端末の位置座標を (X, Y) とし， L [m] の漏えい同軸ケーブルが x の正方向に向かって設置されているものとする．このとき A_2, B_2 は X, Y, θ_{-1}

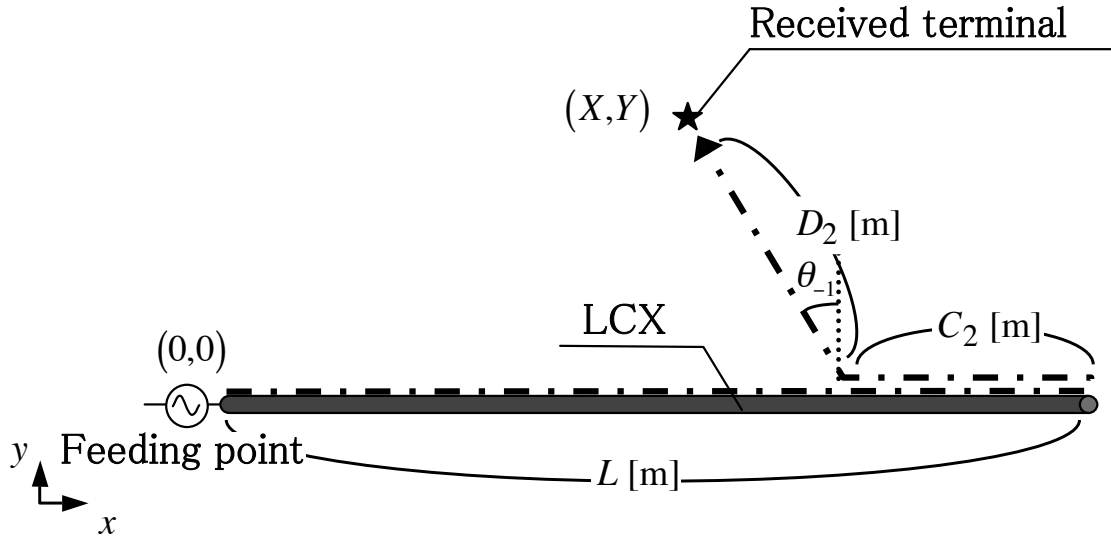


図 2.20: 第二波の伝搬経路

を用いて以下のように表せる .

$$\begin{aligned} A_2 &= X - Y \tan \theta_{-1}, \\ B_2 &= \frac{Y}{\cos \theta_{-1}}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

よって, 式 (2.22) は, 以下のようにになる .

$$t_{b1} = \frac{X - Y \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos \theta_{-1}}. \quad (2.24)$$

次に, 第二波の到着時刻と受信端末の位置座標の関係式を導く. 図 2.20 に第二波の伝搬経路を示す. 終端における反射を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を C_2 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{b2-v} [sec] は, v [m/s] を用いて以下のように表せる .

$$t_{b2-v} = \frac{L + C_2}{v}. \quad (2.25)$$

空間伝搬距離を D_2 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{b2-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる .

$$t_{b2-c} = \frac{D_2}{c}. \quad (2.26)$$

よって, 到着時刻 t_{b2} [sec] は以下のように表せる .

$$t_{b2} = \frac{L + C_2}{v} + \frac{D_2}{c}. \quad (2.27)$$

C_2, D_2 は X, Y, θ_{-1} を用いて以下のように表すことができる．

$$\begin{aligned} C_2 &= L - X - Y \tan \theta_{-1}, \\ D_2 &= \frac{Y}{\cos \theta_{-1}}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

よって，式 (2.27) は，以下ようになる．

$$t_{b2} = \frac{2L - X - Y \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos \theta_{-1}}. \quad (2.29)$$

(X, Y) の推定位置を (\tilde{X}, \tilde{Y}) とすると，式 (2.24)，式 (2.29) を \tilde{X}, \tilde{Y} について解くことで (\tilde{X}, \tilde{Y}) の推定式が以下のように求まる．

$$\tilde{X} = L - (t_{b2} - t_{b1}) \cdot \frac{v}{2}, \quad (2.30)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\frac{2L}{v} - (t_{b1} + t_{b2})}{2 \left(\tan \theta_{-1} \cdot \frac{1}{v} - \frac{1}{\cos \theta_{-1}} \cdot \frac{1}{c} \right)}. \quad (2.31)$$

2.5.2 原理確認実験と誤差評価

実際に実験を行い，提案する終端反射を用いた TOA 位置検出方式が，実際に位置検出が行えること確認することを通じて原理の実証をすると共に，位置検出誤差を求め評価する．

- 実験構成

実験に用いた装置と諸元は 2.4.2 節と同じである．

図 2.21 に実験環境を示す．図のように xy 座標を設定し，給電点が $(1, 0)$ に，終端が $(6, 0)$ に位置するように漏えい同軸ケーブルを設置した．漏えい同軸ケーブルの終端は開放した．黒丸は測定位置を表し，その間隔は 0.5m である．

- 位置検出と検出誤差

測定は，2.4.2 節と同様に，ネットワークアナライザを用いて行った．図 2.22 にインパルス応答の測定例を示す．インパルス応答について二つのパルスが受信された場合，一番目のパルスのピークが受信された時刻が t_{b1} であり，二番目のパルスのピークが受信された時刻が t_{b2} となる．第二波の伝搬時間は第一波の伝搬時間よりも長いので，この順番は変わらない．

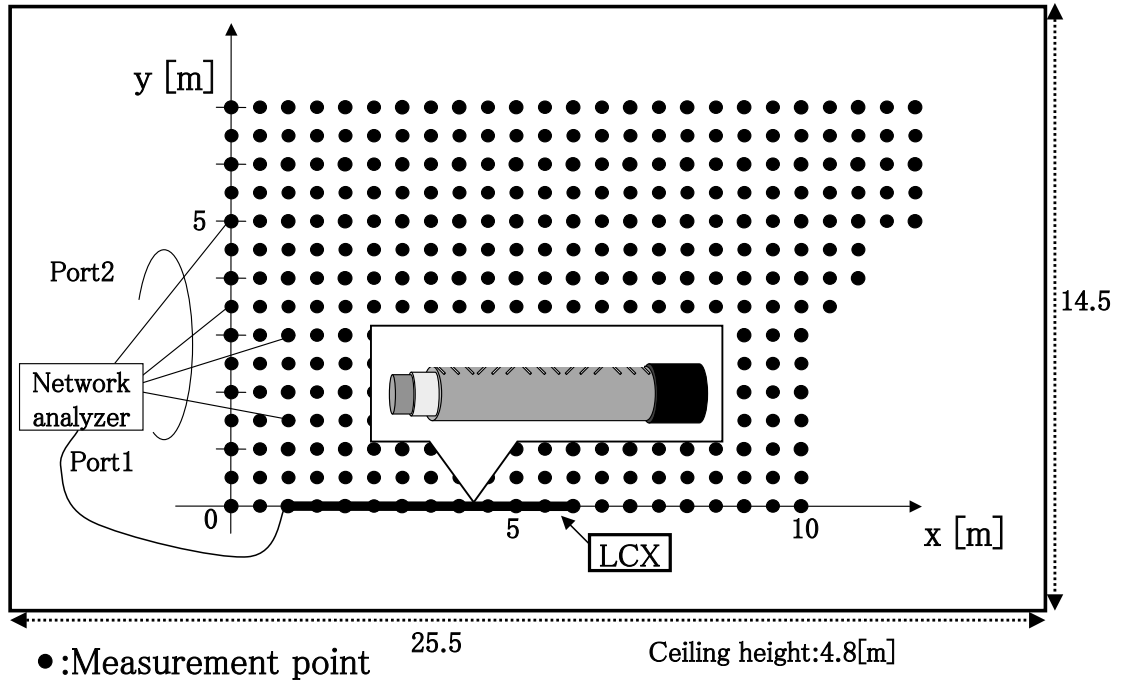


図 2.21: 実験環境

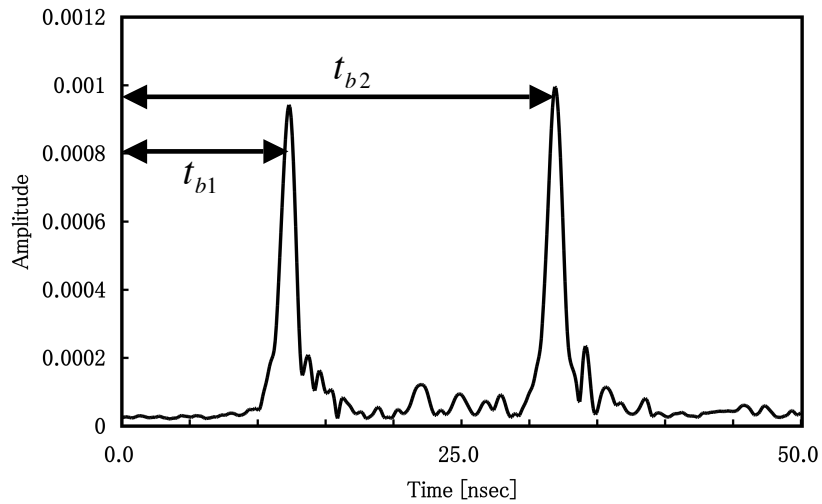


図 2.22: インパルス応答の測定例

各測定点にて、インパルス応答を測定し、 t_{b1} と t_{b2} を求めた後、式 (2.30)、式 (2.31) に代入し、推定位置 (\tilde{X}, \tilde{Y}) を推定した。

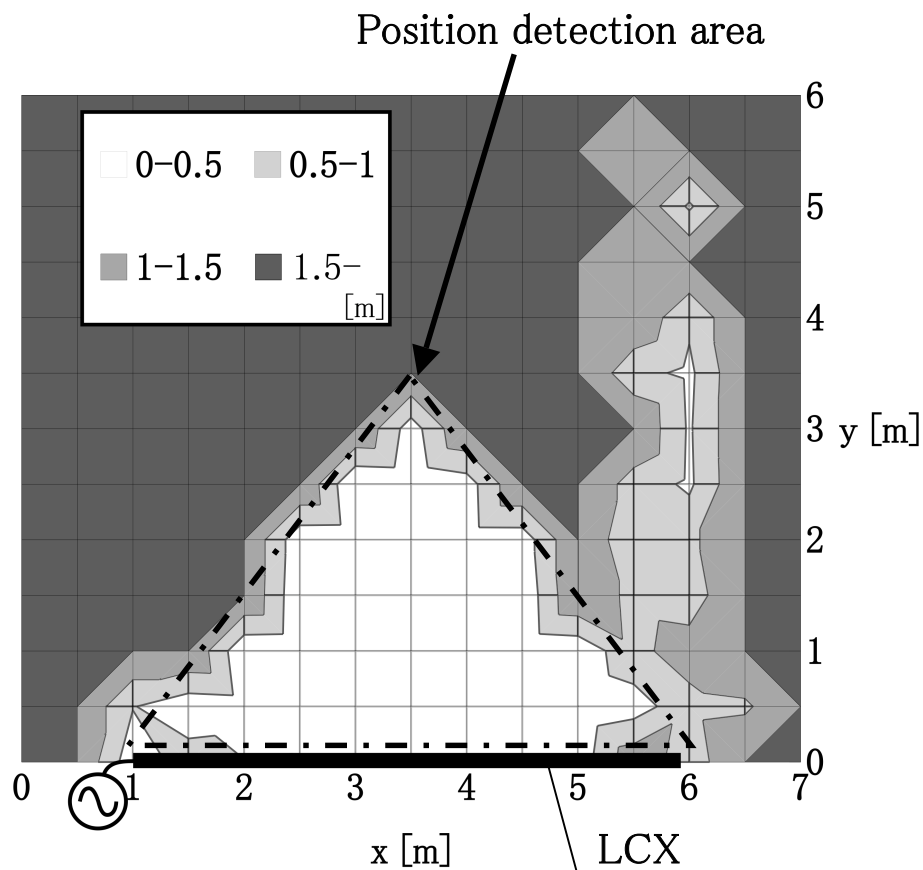


図 2.23: 位置検出誤差の分布

図 2.23 は、位置検出誤差の分布である。第一波によって生じる電波の強め合いにより端末で強い電波が受信される範囲と第二波によって生じる電波の強め合いにより端末で強い電波が受信される範囲が重なる領域を位置検出可能領域と定義すると、図中の点線で囲まれた範囲内が位置検出可能領域となる。誤差が 1.0m 以下である地点を位置検出が可能である地点とすると、位置検出可能領域内では位置検出が可能であることが分かった。位置検出誤差が生じるとして加法性雑音と考えられるが、位置検出誤差 1.0m 以下であるためには電波の到着時刻を誤差 3ns 程度で測定すれば良く、繰り返し測定による SN 比改善により、問題とはならない。

次に位置検出可能領域内における、誤差の累積分布を求めた。図 2.24 に誤差の累積分布のグラフを示す。消防活動時に必要となる誤差 1m 以下となる領域は、位置検出可能領域内の面積の 97 % を占めることが分かった。

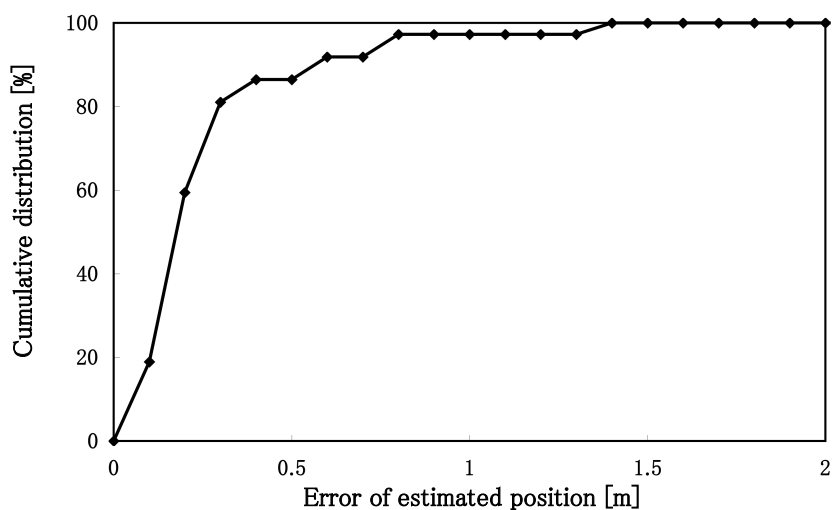


図 2.24: 誤差の累積分布

2.4節の方式では誤差1m以下となる領域は、位置検出可能領域内の面積の64%を占めているのに対して、本節で提案した位置検出方式では誤差1m以下となる領域は、位置検出可能領域内の面積の97%を占めた。

2.6 終端反射方式の実装に対する考察

2.5 節で述べた提案方式では、終端器を取り付けず、終端を開放することで信号を反射させたが、漏えい同軸ケーブルを他の無線通信システムと共用する場合、位置検出用信号以外の信号にとって反射はマルチパス環境を更に強めてしまう可能性がある。これに対して、通信用周波数と位置検出用周波数が異なっている場合は、終端に通信用周波数を吸収、位置検出用周波数の信号のみを反射させるフィルターを取り付ければよい。一方、通信用信号を提案する位置検出方式の信号に用いる場合には、前述のマルチパスに対して、検討が必要となる。しかし、近年は MIMO (Multi Input Multi Output) 技術を導入する無線通信方式が多く登場しており [76]-[79]、このようなマルチパス環境の強まりは、余り問題ではなく、かえってリッチスキャタリング環境となって、MIMO が導入し易い環境となることも期待できると考えている。

2.7 結言

本章では、TOA と RSSI を用いる二次元位置検出方式を提案し、提案方式の原理確認実験を行うことで原理を実証し、提案方式で位置検出が可能であることと位置検出可能領域の 64 % が誤差 1m 以下となることを明らかにした。更に、漏えい同軸ケーブルの終端で検出用の信号を反射させることで、生じた 2 つの伝搬経路のそれぞれの TOA を用いる方式を提案し、同じく提案方式の原理確認実験を行うことで原理を実証し、提案方式で位置検出が可能であることと位置検出可能領域の 97 % が誤差 1m 以下となることを明らかにした。

本章で提案した方式は到着時刻を用いており、位置検出を行うためには、送信機と受信機の時計を正確に一致させる必要が有る。しかしながら、現実的には、送信機と受信機の時計を一致させることは難しい。3,4 章では、送信機と受信機の時計を一致させる必要のない、電波の到着時刻差を用いる位置検出方式を提案する。

第3章 終端反射と屈曲配置を用いた到着時刻差位置検出方式

3.1 序言

本章では，送信機と受信機間の時間同期を不要とする，複数の電波の到着時刻差 (TDOA: Time Difference Of Arrival) を用いる方式を提案する．漏えい同軸ケーブルを屈曲配置することによって，電波の伝搬経路の数を4つに増加させ，4つのTOAから選択した3つのTDOAを用いて，位置検出を可能としている．本方式の位置検出可能領域を導出すると共に，実験により位置検出原理を実証し，位置検出誤差を求め評価する．

3.2 屈曲配置によるTDOA化

本節では，図3.1～図3.4に示すように，漏えい同軸ケーブルを屈曲させて配置する事によって生じる4つの伝搬経路について述べる．同図に示すように，4つの電波を給電点から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第一波，屈曲点から終端までの漏えい同軸ケーブルから放射される第二波，終端から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第三波，屈曲点から給電点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第四波と呼ぶことにする．受信端末は，4波全てあるいは4波のうち3波を受信する．

3.2.1 第一波及び第二波の伝搬経路

給電点から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第一波の伝搬経路と到着時刻について述べる．図3.1に給電点から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第一波の伝搬経路(a)を示す．給電点から漏えい同軸ケーブルに入力された信号は，ケーブル内を伝送後，最大放射指向角度 θ_{-1} で放射される．空間に放射された信号は，受信端末で受信される．漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を $A_3[\text{m}]$ とすると，その伝搬時間 $t_{c1-v}[\text{sec}]$ は，群速度 $v[\text{m/s}]$ を用いて以下のように

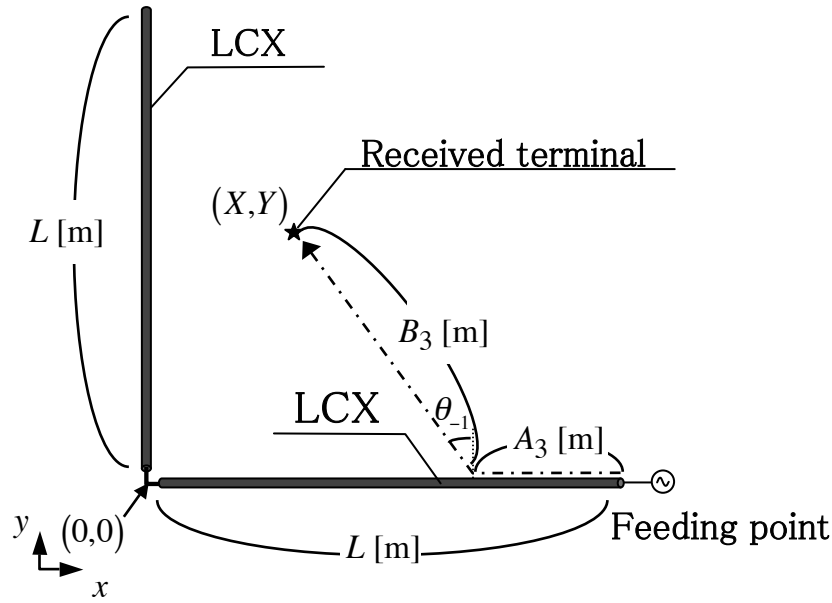


図 3.1: 第一波の伝搬経路 (a)

表せる .

$$t_{c1-v} = \frac{A_3}{v}. \quad (3.1)$$

空間伝搬距離を B_3 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{c1-c} [sec] は, 空間中の伝搬速度 c [m/s] を用いて以下のように表せる .

$$t_{c1-c} = \frac{B_3}{c}. \quad (3.2)$$

よって, 給電点から端末までの到着時刻 t_{c1} [sec] は以下のように表せる .

$$t_{c1} = \frac{A_3}{v} + \frac{B_3}{c}. \quad (3.3)$$

次に, 屈曲点から終端までの漏えい同軸ケーブルから放射される第二波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 同様に, 図 3.2 に屈曲点から終端までの漏えい同軸ケーブルから放射される第二波の伝搬経路 (b) を示す. 屈曲点を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を C_3 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{c2-v} [sec] は, v [m/s] を用いて以下のように表せる .

$$t_{c2-v} = \frac{L + C_3}{v}. \quad (3.4)$$

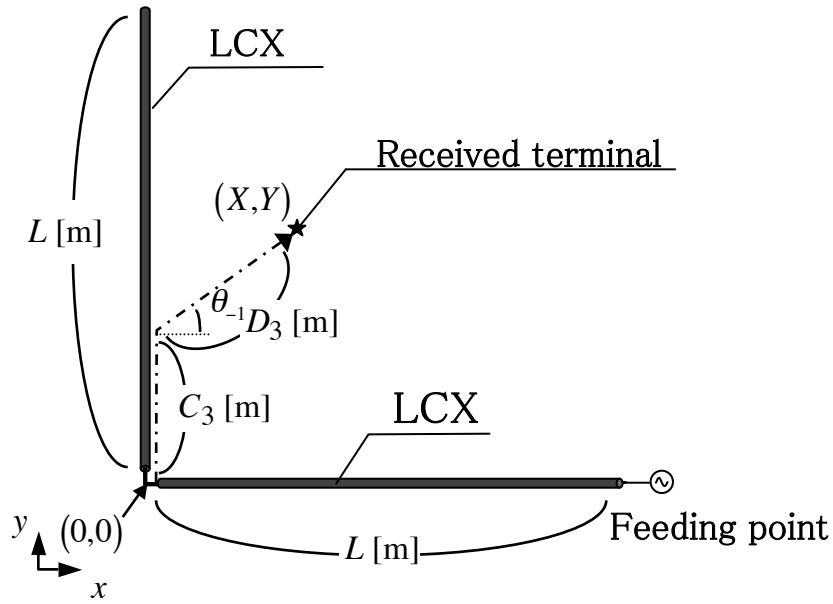


図 3.2: 第二波の伝搬経路 (b)

空間伝搬距離を D_3 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{c2-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{c2-c} = \frac{D_3}{c}. \quad (3.5)$$

よって, 到着時刻 t_{c2} [sec] は以下のように表せる.

$$t_{c2} = \frac{L + C_3}{v} + \frac{D_3}{c}. \quad (3.6)$$

3.2.2 第三波及び第四波の伝搬経路

終端点から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第三波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 3.3 に終端点から屈曲点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第三波の伝搬経路 (c) を示す. 終端における反射を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を E_3 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{c3-v} [sec] は, 群速度 v [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{c3-v} = \frac{2L + E_3}{v}. \quad (3.7)$$

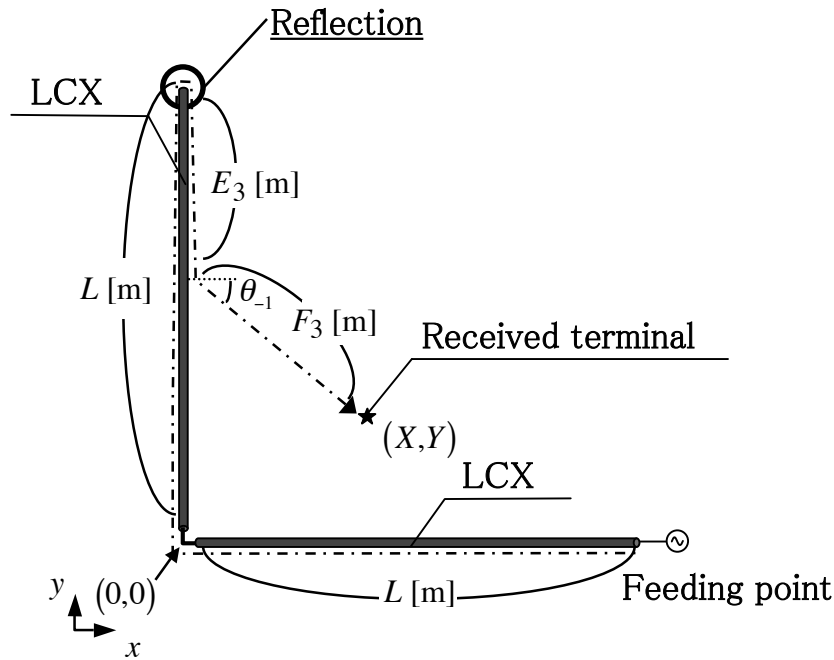


図 3.3: 第三波の伝搬経路 (c)

空間伝搬距離を F_3 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{c3-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{c3-c} = \frac{F_3}{c}. \quad (3.8)$$

よって, 到着時刻 t_{c3} [sec] は以下のように表せる.

$$t_{c3} = \frac{2L + E_3}{v} + \frac{F_3}{c}. \quad (3.9)$$

次に, 屈曲点から給電点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第四波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 3.4 に屈曲点から給電点までの漏えい同軸ケーブルから放射される第四波の伝搬経路 (d) を示す. 終端での反射を経て, さらに屈曲点を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を G_3 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{c4-v} [sec] は, v [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{c4-v} = \frac{3L + G_3}{v}. \quad (3.10)$$

空間伝搬距離を H_3 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{c4-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{c4-c} = \frac{H_3}{c}. \quad (3.11)$$

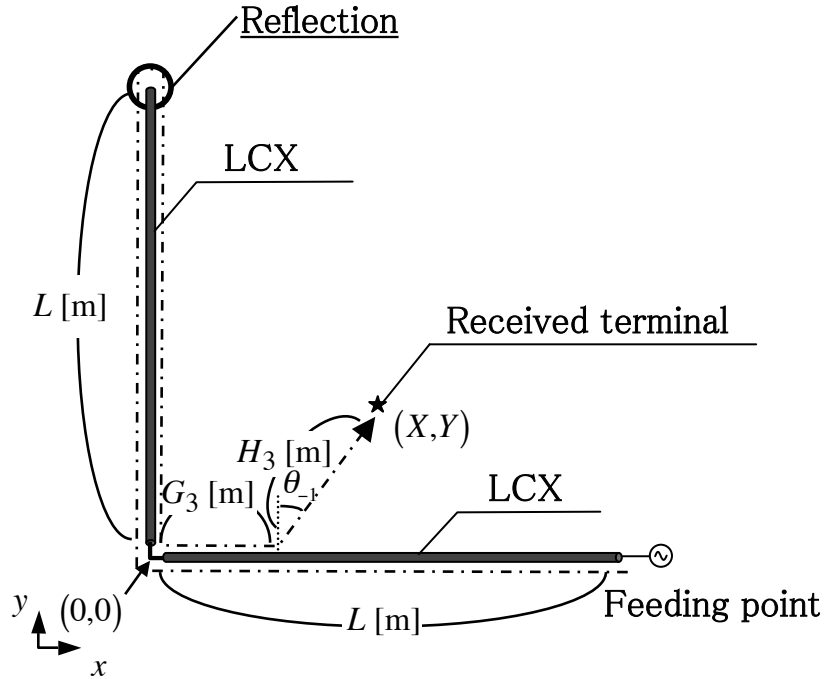


図 3.4: 第四波の伝搬経路 (d)

よって、到着時刻 $t_{c4}[\text{sec}]$ は以下のように表せる。

$$t_{c4} = \frac{3L + G_3}{v} + \frac{H_3}{c}. \quad (3.12)$$

図 3.1 ~ 図 3.4 に示す xy 平面上にて漏えい同軸ケーブルと受信端末の位置を以下のようにする。給電点の位置座標が $(L, 0)$ 、屈曲点の位置座標が $(0, 0)$ 、漏えい同軸ケーブルの終端の位置座標が $(0, L)$ 、となるように二本の $L[\text{m}]$ の漏えい同軸ケーブルを直角に配置する。受信端末の位置座標を (X, Y) とする。このとき $A_3 \sim H_3$ は L, X, Y, θ_{-1} を用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} A_3 &= L - X - |Y| \tan \theta_{-1}, \\ B_3 &= H_3 = \frac{|Y|}{\cos \theta_{-1}}, \\ C_3 &= Y - |X| \tan \theta_{-1}, \\ D_3 &= F_3 = \frac{|X|}{\cos \theta_{-1}}, \\ E_3 &= L - Y - |X| \tan \theta_{-1}, \\ G_3 &= X - |Y| \tan \theta_{-1}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

よって, $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}, t_{c4}$ は, それぞれ以下のようになる.

$$t_{c1} = \frac{L - X - |Y| \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{|Y|}{c \cdot \cos \theta_{-1}}, \quad (3.14)$$

$$t_{c2} = \frac{L + Y - |X| \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{|X|}{c \cdot \cos \theta_{-1}}, \quad (3.15)$$

$$t_{c3} = \frac{3L - Y - |X| \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{|X|}{c \cdot \cos \theta_{-1}}, \quad (3.16)$$

$$t_{c4} = \frac{3L + X - |Y| \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{|Y|}{c \cdot \cos \theta_{-1}}. \quad (3.17)$$

3.3 提案方式の原理

本節では, 3.2節で示した4つの伝搬経路とその到着時刻の差を用いて, 推定位置の推定式を導出する.

提案方式では, 漏えい同軸ケーブルと検出対象となる受信機との位置関係により受信する電波の伝搬経路の数が異なる. 二次元の位置座標を推定するためには, 3つの経路の到着時刻の差を必要とするため, 受信する伝搬経路が異なる電波の数が2つ以下の領域は位置検出可能領域の対象外とし, 3つ以上となる領域が位置検出可能領域となる.

図3.5に伝搬経路に基づく位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせを示す. 図3.5に示すように, $0 \leq \theta_{-1} < \frac{\pi}{4}$ の場合には伝搬路数が3つと4つの領域が混在し, $\frac{\pi}{4} \leq \theta_{-1} \leq \frac{\pi}{2}$ の場合には, 伝搬路数が4つの領域は存在しない. 提案方式では, 3つの波が受信される場合 (a)(b)(c), (a)(b)(d), (a)(c)(d), (b)(c)(d) の4通りであり, 4つの波が受信される場合 (a)(b)(c)(d) の1通りである. それぞれの場合について, 位置の推定式を導出する.

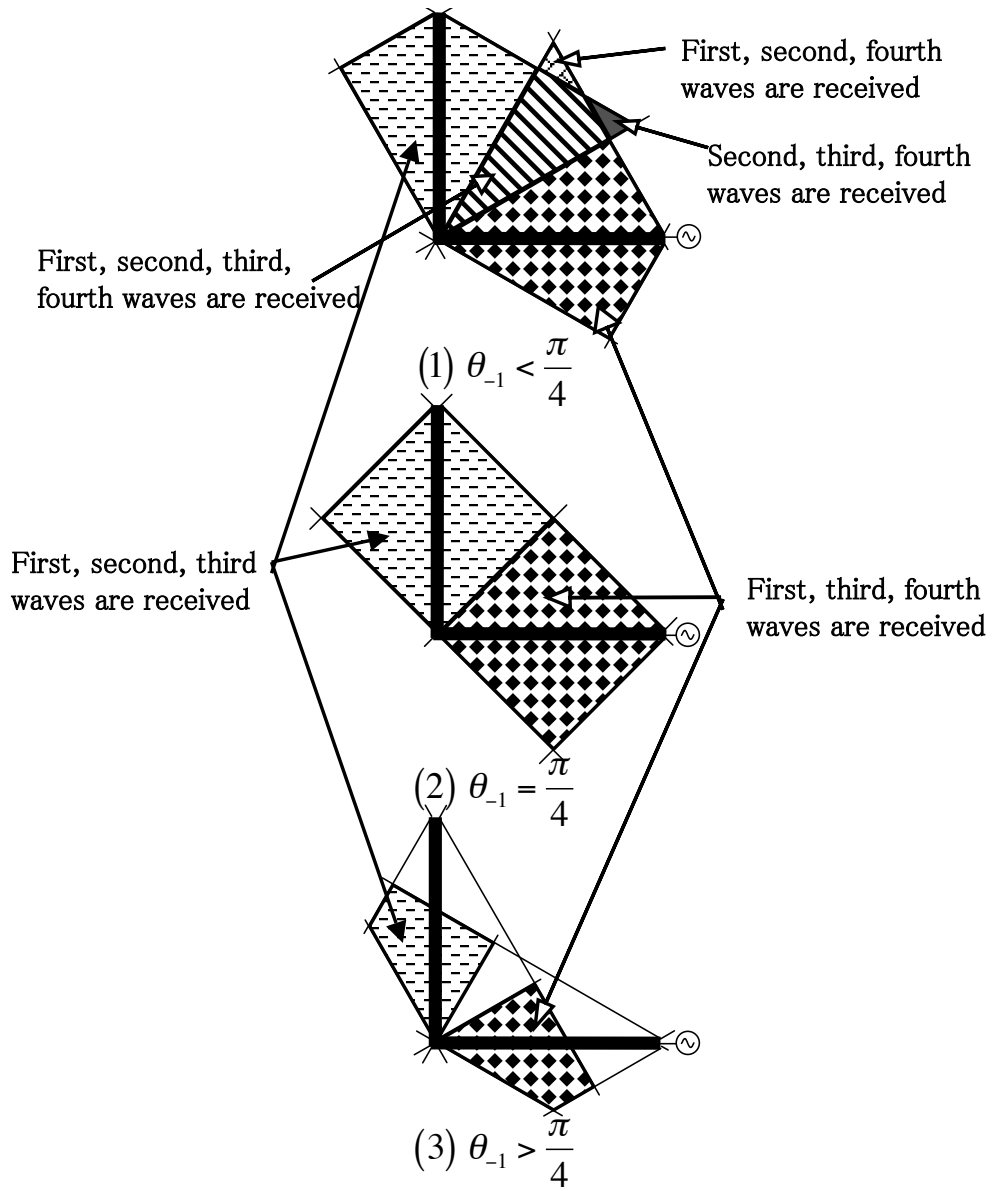


図 3.5: 位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせ

3.3.1 位置の推定式

- (a)(b)(c) を受信する領域で用いる推定式

(a)(b)(c) の3波の受信領域では, 一番目の受信波(第一波)と二番目の受信波(第二波)の到着時刻差 $\Delta_{c12} = t_{c2} - t_{c1}$, 一番目の受信波(第一波)と三番目の受信波(第三波)の到着時刻差 $\Delta_{c13} = t_{c3} - t_{c1}$ を用いると, 推定位置座標 $(\tilde{X} \tilde{Y})$ は以下のようになる.

$$\tilde{Y} = \frac{2L - (\Delta_{c13} - \Delta_{c12}) \cdot v}{2}, \quad (3.18)$$

$$\tilde{X} = \frac{\frac{2L}{v} - \Delta_{c13} + \frac{2L - (\Delta_{c13} - \Delta_{c12}) \cdot v}{2} \left(\frac{-1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{-1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}. \quad (3.19)$$

ただし式(3.19)を計算した結果, $\tilde{X} < 0$ となった場合, 改めて

$$\tilde{X} = \frac{\frac{2L}{v} - \Delta_{c13} + \frac{2L - (\Delta_{c13} - \Delta_{c12}) \cdot v}{2} \left(\frac{-1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{-1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}, \quad (3.20)$$

を適用する.

- (a)(b)(d) を受信する領域で用いる推定式

(a)(b)(d) の3波の受信領域では, 一番目の受信波(第一波)と二番目の受信波(第二波)の到着時刻差 $\Delta_{c12} = t_{c2} - t_{c1}$, 一番目の受信波(第一波)と三番目の受信波(第四波)の到着時刻差 $\Delta_{c14} = t_{c4} - t_{c1}$ を用いると, 推定位置座標 $(\tilde{X} \tilde{Y})$ は以下のようになる.

$$\tilde{X} = \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2}, \quad (3.21)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{c12} + \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2} \left(\frac{1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{-1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}. \quad (3.22)$$

- (a)(c)(d) を受信する領域で用いる推定式

(a)(c)(d) の3波の受信領域では, 一番目の受信波(第一波)と二番目の受信波(第三波)の到着時刻差 $\Delta_{c13} = t_{c3} - t_{c1}$, 一番目の受信波(第一波)と三番目の受信波

(第四波)の到着時刻差 $\Delta_{c14} = t_{c4} - t_{c1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下のようになる.

$$\tilde{X} = \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2}, \quad (3.23)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\frac{2L}{v} - \Delta_{c13} + \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2} \left(\frac{1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}. \quad (3.24)$$

ただし式 (3.24) を計算した結果, $\tilde{Y} < 0$ となった場合, 改めて

$$\tilde{Y} = \frac{\frac{2L}{v} - \Delta_{c13} + \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2} \left(\frac{1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{1 + \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}, \quad (3.25)$$

を適用する.

- (b)(c)(d) を受信する領域で用いる推定式

(b)(c)(d) の3波の受信領域では, 一番目の受信波 (第二波) と二番目の受信波 (第三波) の到着時刻差 $\Delta_{c23} = t_{c3} - t_{c2}$, 一番目の受信波 (第二波) と三番目の受信波 (第四波) の到着時刻差 $\Delta_{c24} = t_{c4} - t_{c2}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下のようになる.

$$\tilde{Y} = \frac{2L - \Delta_{c23} \cdot v}{2}, \quad (3.26)$$

$$\tilde{X} = \frac{\frac{2L}{v} - \Delta_{c24} + \frac{2L - \Delta_{c23} \cdot v}{2} \left(\frac{-1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} \right)}{\frac{-1 - \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}}}. \quad (3.27)$$

- (a)(b)(c)(d) の領域

(a)(b)(c)(d) の4波の受信領域では, 一番目の受信波 (第一波) と二番目の受信波 (第二波) の到着時刻差 $\Delta_{c12} = t_{c2} - t_{c1}$, 一番目の受信波 (第一波) と三番目の受信波 (第三波) の到着時刻差 $\Delta_{c13} = t_{c3} - t_{c1}$, 一番目の受信波 (第一波) と四番目の受信波 (第四波) の到着時刻差 $\Delta_{c14} = t_{c4} - t_{c1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下のようになる.

$$\tilde{X} = \frac{\Delta_{c14} \cdot v - 2L}{2}, \quad (3.28)$$

$$\tilde{Y} = \frac{2L - (\Delta_{c13} - \Delta_{c12}) \cdot v}{2}. \quad (3.29)$$

3.3.2 伝搬経路の特定

受信波の伝搬経路の特定方法について述べる．4波受信されれば，4つの受信波の伝搬経路 (a)(b)(c)(d) の順番に受信され，その順番は入れ替わることはないので，受信した順番に (a)(b)(c)(d) と決定すればよい．しかしながら，3波が受信された場合，受信波の伝搬経路を特定する必要がある．伝搬経路の特定のために，図3.6のように十分長い同軸ケーブルを屈曲点及び終端に接続する．同軸ケーブルの長さを LEN_1 [m] とする． Δ_{c12} は第二波の伝搬距離が LEN_1 だけ長くなるため， $\frac{LEN_1}{v}$ 増加する． Δ_{c13} ， Δ_{c23} ， Δ_{c24} ，第三波と第四波の到着時刻差 Δ_{c34} も，それぞれ $\frac{3LEN_1}{v}$ ， $\frac{2LEN_1}{v}$ ， $\frac{3LEN_1}{v}$ ， $\frac{LEN_1}{v}$ 増加する． LEN_1 が十分長いとき，以下の式が成り立つ．

$$\frac{LEN_1}{v} < \Delta_{c12} < \frac{2LEN_1}{v}, \quad (3.30)$$

$$\frac{3LEN_1}{v} < \Delta_{c13} < \frac{4LEN_1}{v}, \quad (3.31)$$

$$\frac{2LEN_1}{v} < \Delta_{c23} < \frac{3LEN_1}{v}, \quad (3.32)$$

$$\frac{3LEN_1}{v} < \Delta_{c24} < \frac{4LEN_1}{v}, \quad (3.33)$$

$$\frac{LEN_1}{v} < \Delta_{c34} < \frac{2LEN_1}{v}. \quad (3.34)$$

つまり，一番目の受信波と二番目の受信波の到着時刻差を t_A ，二番目の受信波と三番目の受信波の到着時刻差を t_B とすると

- (a)(b)(c) の3波を受信する領域

$$t_A < \frac{2LEN_1}{v}, \quad (3.35)$$

$$\frac{2LEN_1}{v} \leq t_B < \frac{3LEN_1}{v}, \quad (3.36)$$

の場合，(a)(b)(c) の3波を受信する領域となり，受信した順番に (a)(b)(c) と決定される．

- (a)(b)(d) の3波を受信する領域

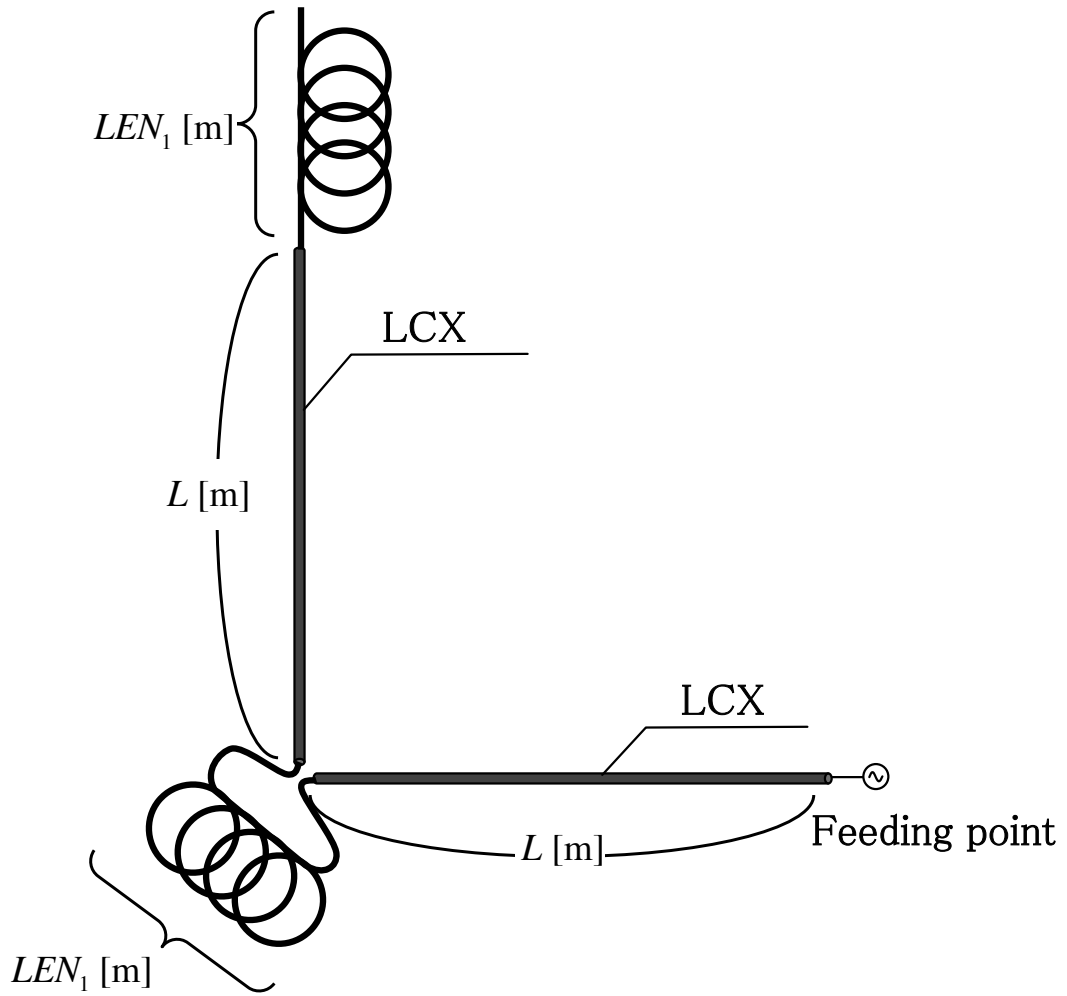


図 3.6: 伝搬経路特定のための同軸ケーブルの接続

$$t_A < \frac{2LEN_1}{v}, \quad (3.37)$$

$$t_B \geq \frac{3LEN_1}{v}, \quad (3.38)$$

の場合，(a)(b)(d) の 3 波を受信する領域となり，受信した順番に (a)(b)(d) と決定される．

- (a)(c)(d) の 3 波を受信する領域

$$t_A \geq \frac{3LEN_1}{v}, \quad (3.39)$$

$$t_B < \frac{2LEN_1}{v}, \quad (3.40)$$

の場合, (a)(c)(d) の3波を受信する領域となり, 受信した順番に (a)(c)(d) と決定される.

- (b)(c)(d) の3波を受信する領域

$$\frac{2LEN_1}{v} \leq t_A < \frac{3LEN_1}{v}, \quad (3.41)$$

$$t_B < \frac{2LEN_1}{v}, \quad (3.42)$$

の場合, (b)(c)(d) の3波を受信する領域となり, 受信した順番に (b)(c)(d) と決定される.

なお, 接続する余長の長さ LEN_1 は $LEN_1 \geq 2L$ を満たす必要がある. これは, $LEN_1 < 2L$ の場合, 式(3.30)~式(3.34) が成り立たないため, t_A, t_B を用いた判別ができないが, $LEN_1 \geq 2L$ の場合, 判別が可能であるためである.

3.4 位置検出可能領域面積の評価

図3.5に示した伝搬経路に基づく位置検出可能領域の面積は, 漏えい同軸ケーブルの最大放射指向角度 θ_{-1} に依存する.

放射指向角度 θ_{-1} の値によって漏えい同軸ケーブルから放射される電波が強め合う領域の重なり具合が変化するため, 面積の求め方は放射指向角度 θ_{-1} の値に依存して変化する. 図3.7に位置検出可能領域と θ_{-1} の関係を示す. 以下に位置検出可能領域面積 $S[\text{m}^2]$ を求める式を, θ_{-1} で場合分けして記述する. ただし, 漏えい同軸ケーブルの一边の長さは $L[\text{m}]$ とする.

- $0 \leq \theta_{-1} \leq \frac{\pi}{8}$ の場合

$$S = L^2 \cos^2 \theta_{-1} - S_4 - L^2 \sin^2 \theta_{-1} \cdot \tan 2\theta_{-1}. \quad (3.43)$$

ただし $S_4[\text{m}^2]$ は (a)(b)(c)(d) の伝搬経路を経た全ての電波が受信される領域の面積であり, 以下の式で求められる.

$$S_4 = L^2 \cos^2 \theta_{-1} \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} - \theta_{-1} \right). \quad (3.44)$$

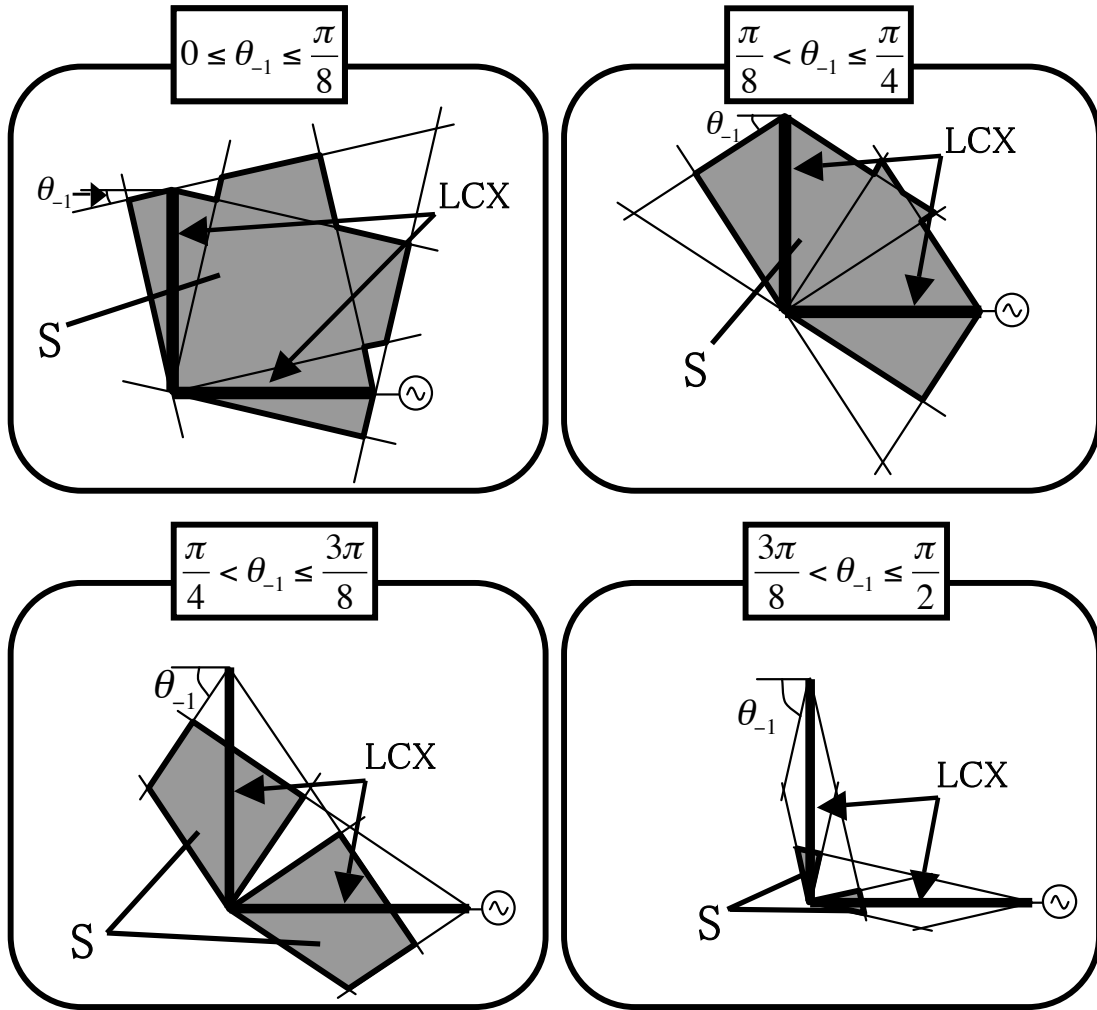


図 3.7: 位置検出可能領域と θ_{-1} の関係

- $\frac{\pi}{8} < \theta_{-1} \leq \frac{\pi}{4}$ の場合

$$S = 2L^2 \cos \theta_{-1} \cdot \sin \theta_{-1} + S_4 + \left(\frac{1}{2 \sin \theta_{-1}} - \cos \theta \right)^2 L^2 \cdot \tan 2\theta_{-1}. \quad (3.45)$$

- $\frac{\pi}{4} < \theta_{-1} \leq \frac{3\pi}{8}$ の場合

$$S = \left\{ L \cos \theta_{-1} + \frac{L}{2 \sin \theta_{-1}} - \sqrt{2} L \sin \left(\theta_{-1} - \frac{\pi}{4} \right) \right\} \cdot \frac{L}{2 \sin \theta_{-1}} \cdot \sin (\pi - 2\theta_{-1}) \quad (3.46)$$

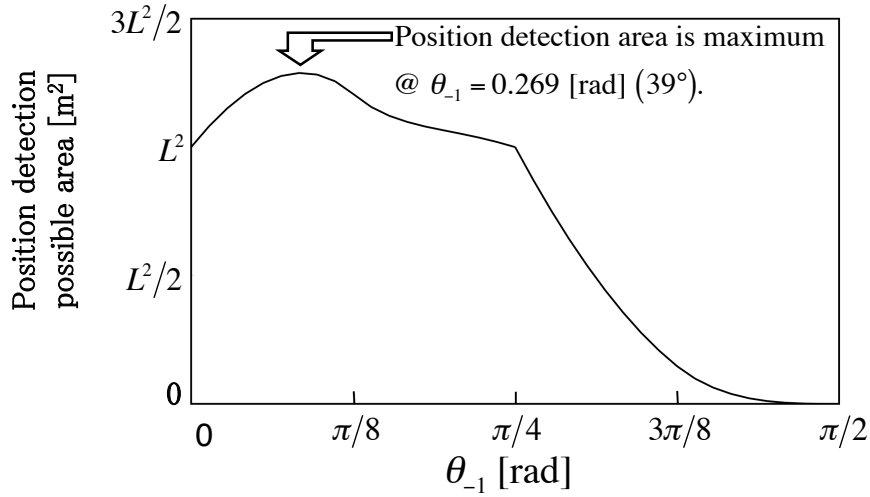


図 3.8: 最大放射指向角度 θ_{-1} と位置検出可能領域面積の関係

- $\frac{3\pi}{8} < \theta_{-1} \leq \frac{\pi}{2}$ の場合

$$S = L^2 \cos^2 \theta_{-1} \cdot \tan(\pi - 2\theta_{-1}). \quad (3.47)$$

図 3.8 は、式 (3.43) から式 (3.47) から計算した位置検出可能領域の面積と θ_{-1} の関係を示す。 $\theta_{-1} = 0.269[\text{rad}]$ (15.4 度) のとき、 S が、最大となることが分かる。このことから、 $\theta_{-1} = 0.269[\text{rad}]$ のときに、位置検出可能領域が最大となり、最も広い範囲で位置検出が可能であることが明らかになった。

3.5 原理確認実験と誤差評価

原理確認実験により，原理の実証を行うと共に誤差を求める．

- 実験構成

実験装置は 2.4.2 節と同一である．図 3.9 に実験環境を示す． xy 座標を設定したとき，給電点の位置座標が $(L, 0)$ ，屈曲点の位置座標が $(0, 0)$ ，漏えい同軸ケーブルの終端の位置座標が $(0, L)$ ，となるように二本の $L[\text{m}]$ の漏えい同軸ケーブルを直角に配置した．黒丸は測定点を表し，その間隔は 0.5m である．

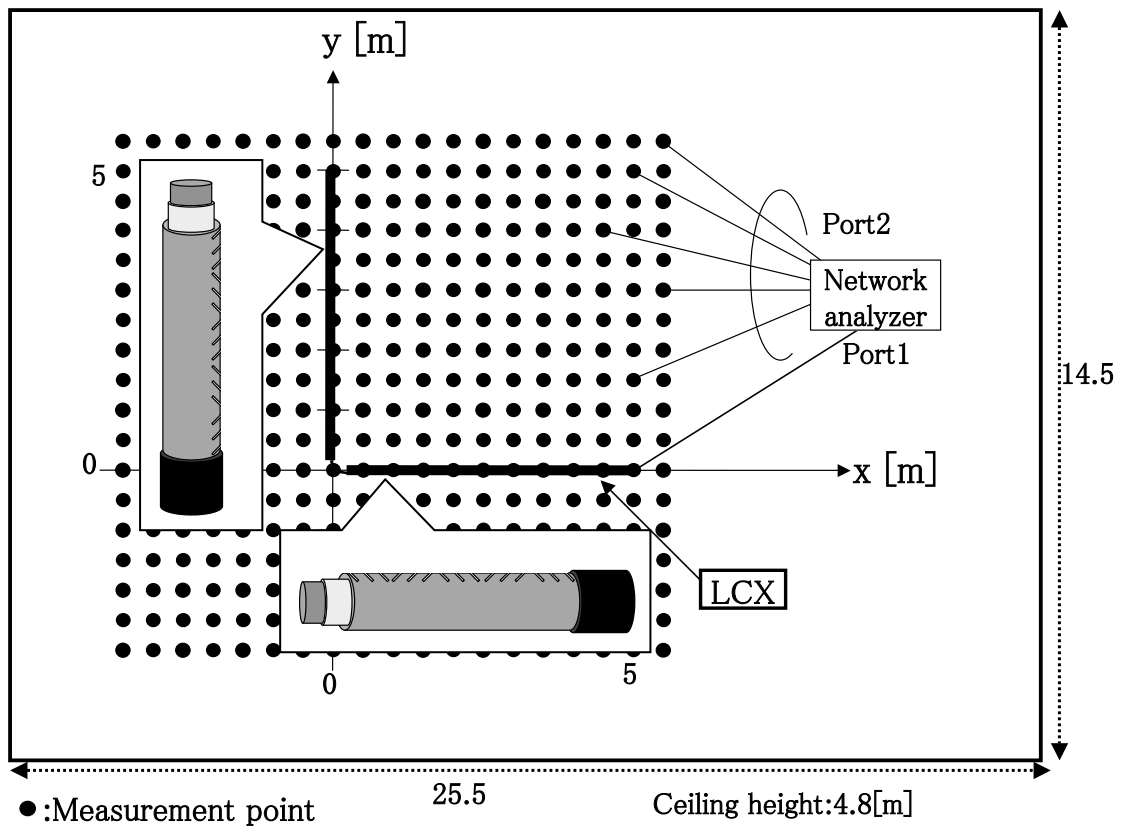


図 3.9: 実験環境

図 3.10 にインパルス応答の測定例を示す．各測定点にて，給電点と受信アンテナ間のインパルス応答を測定し，3つのパルスのピークについて，その時間差から伝搬経路の組み合わせを特定し，位置 (\tilde{X}, \tilde{Y}) を推定した．

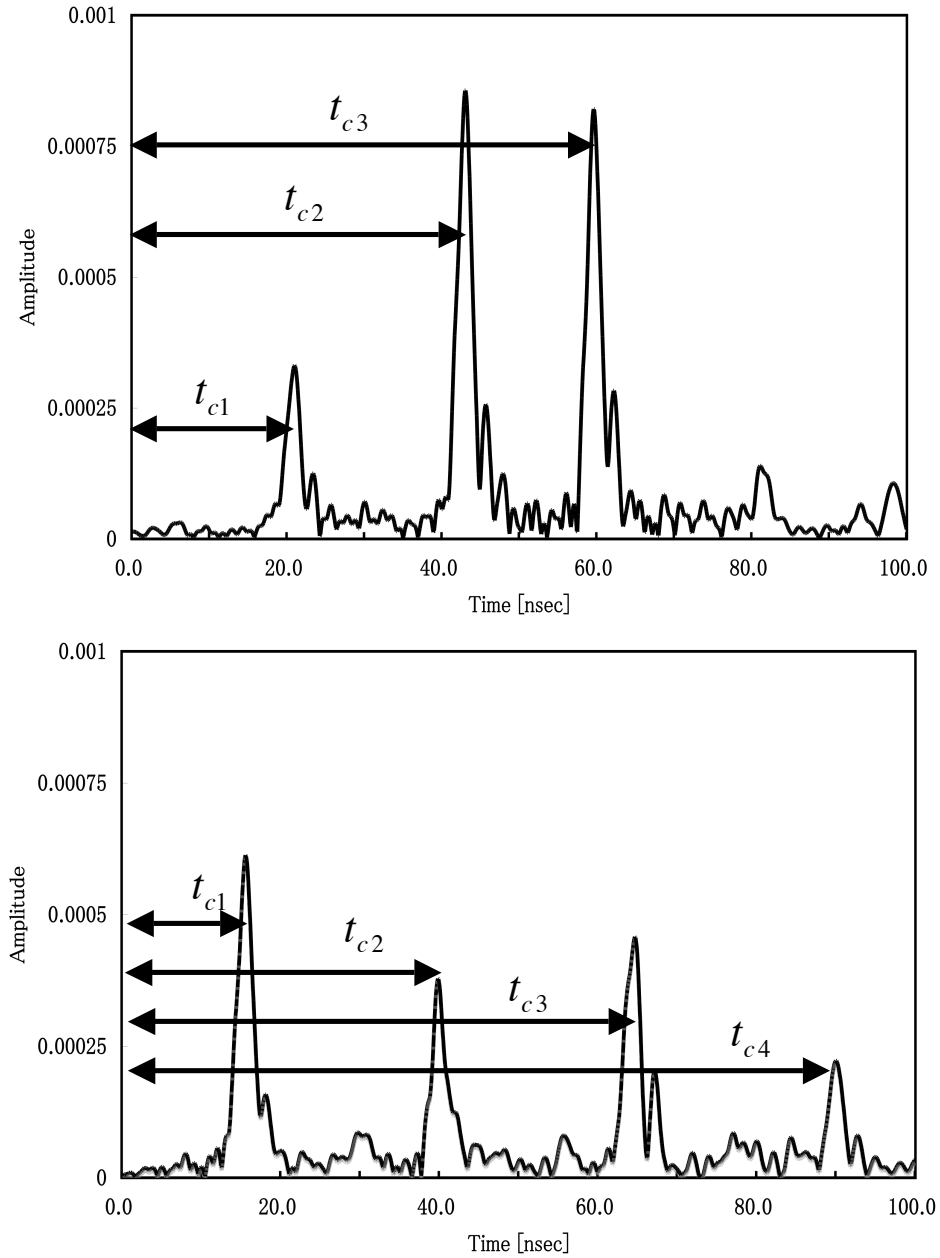


図 3.10: インパルス応答の測定例

図 3.11 は、位置検出誤差の分布である。図中の点線で囲まれた範囲内が 3 つの電波の強め合う領域が重なる位置検出可能領域である。誤差 1.0m 以下となった位置を位置検出可能な位置とした場合、位置検出可能領域内では大部分が位置検出が可能であった。座標 (2, 2) において、位置検出可能領域内であるにもかかわらず誤差が大きい。この地点は、本来 4 波受信できるが、3 波受信の地点と取り扱ったため、伝搬経路の組み合わせを誤った事により誤差が増大した。実験で用いた漏えい同軸ケーブルでは、4 波受信できる領域が 3 波受信できる領域と比較するととても小さいため、全て 3 波受信できる領域としたためである。

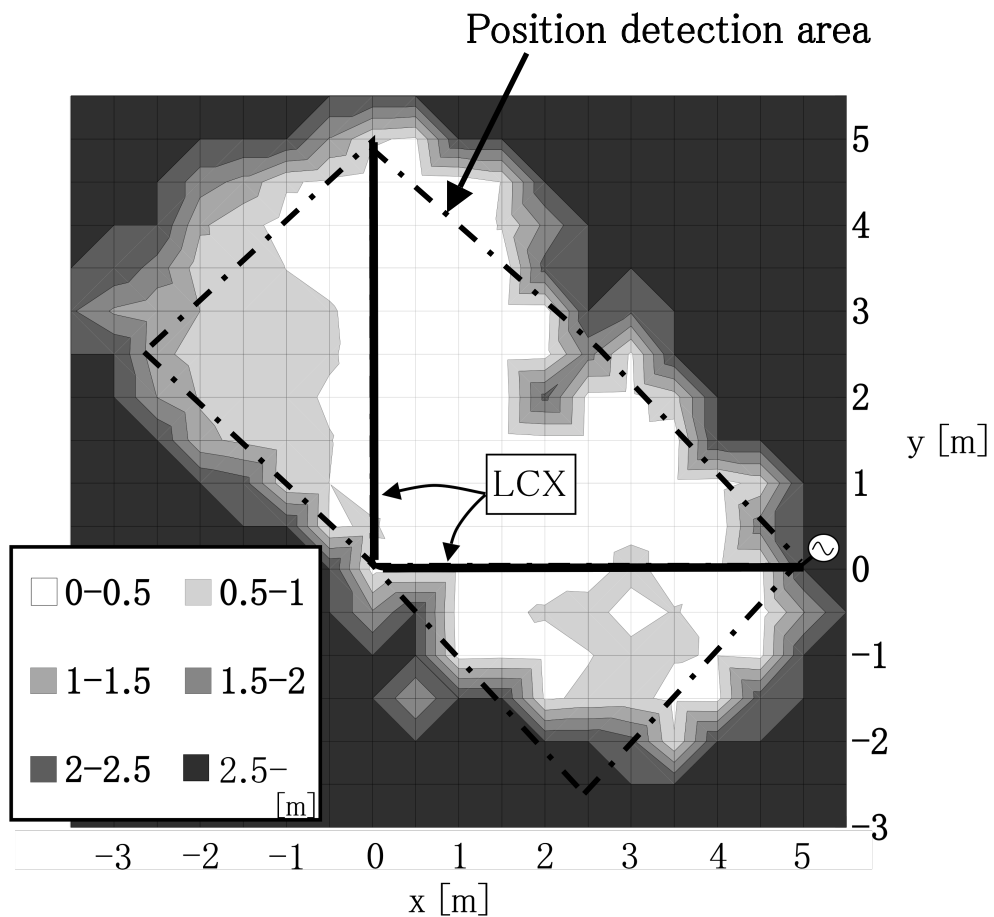


図 3.11: 位置検出誤差の分布

次に誤差の累積分布を求めた．図 3.12 に誤差の累積分布のグラフを示す．本章で提案した位置検出方式では誤差 1m 以下となった領域は，位置検出可能領域内の面積の 89 % を占めた．伝搬経路の組み合わせを誤った地点や受信電力が弱くピークを誤った地点では，誤差が大きい．

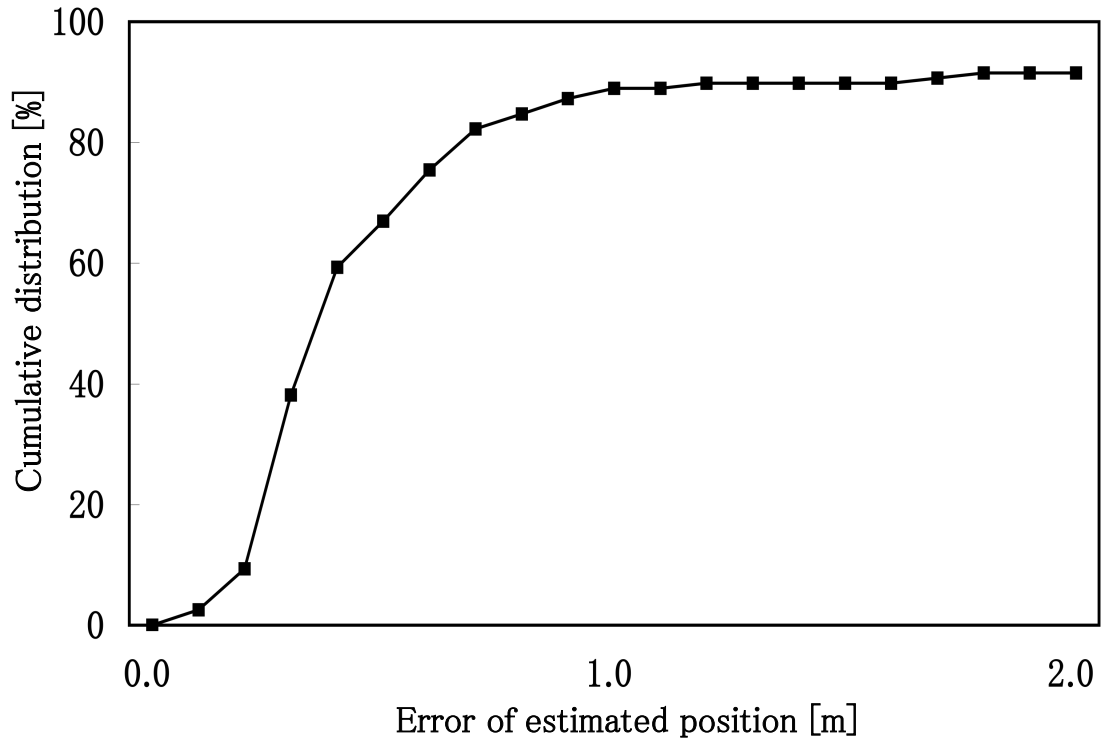


図 3.12: 誤差の累積分布

3.6 結言

本章では、漏えい同軸ケーブルを屈曲配置することで、送信機（基地局設備）と受信機（移動端末）の時計を同期させる必要のない二次元位置検出方式を提案した。2章で提案した二次元位置検出方式は到着時刻を用いた方式であったため、送信機と受信機の時計が同期している必要があったが、本章で提案した二次元位置検出方式は、到着時刻差を用いて位置検出を行う方式であるため、送信機と受信機間の時計を同期させる必要のない方式である。漏えい同軸ケーブルを屈曲させて配置することによって、端末が受信する電波の伝搬経路を4波へと増加させ、4つのTOAから選択した3つのTDOAを用いて、位置検出を可能としている。位置検出可能領域を導出することで、 $\theta_{-1} = 0.269[\text{rad}]$ のときに、位置検出可能領域の面積が最大となることを明らかにした。提案方式の原理確認実験を行うことで原理を実証し、誤差の評価を行った結果、位置検出可能領域内の89%が誤差1m以下となることを明らかにした。

第4章 終端反射と二方向指向性を用いた到着時刻差位置検出方式

4.1 序言

本章で提案する位置検出方式は，二方向に指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用いて，漏えい同軸ケーブルを進行して行く2波と終端で反射してくる2波を空間に放射させ，これら4波のTDOAを用いて二次元位置検出を行うものである．まず，漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件を示した後，FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain method) を用いたシミュレーションにより給電点と受信アンテナ間の4波の伝搬路応答を導出する．次に4波の到着時刻差から端末の二次元位置検出を行う位置検出原理について説明する．最後にシミュレーションによって位置検出誤差を求めると共に，位置検出可能領域の面積を評価する．

4.2 二方向指向性によるTDOA化

漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件について述べる．放射指向角度 θ_m は以下の式で求められる．

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\sqrt{\epsilon_r + \frac{m\lambda_{RF}}{P}} \right). \quad (4.1)$$

$(m = -1, -2, -3, \dots)$

このとき， m は放射される電波のモード次数である．一般に漏えい同軸ケーブルはジグザグにスロットが設けられており， m が偶数の場合， $\frac{P}{2}$ 離れたスロットから放射される電波と打ち消し合うため，放射は漏えい同軸ケーブルの長手方向のみとなる．図4.1に，式(4.1)から求められる電波の放射指向角度と $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ の関係をモード次数をパラメータとして示す．図4.1には， $m = -1, m = -3, m = -5$ の場合の電波の放射指向角度と $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ の関係を示しており， $0.427 \leq \frac{\lambda_{RF}}{P} \leq 0.712$ であれば，2つのモード， $m = -1, -3$ の，すなわち2つの放射指向角度を持つ放射波を得ることができ，それぞれの放射指向角度 θ_{-1}, θ_{-3} は， $\theta_{-1} > 0 > \theta_{-3}$ の関係になる．

二方向に指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用い，かつ終端で電波を反射させることで4つの伝搬経路を作ることができる．図4.2～図4.5に示すように，4つの電

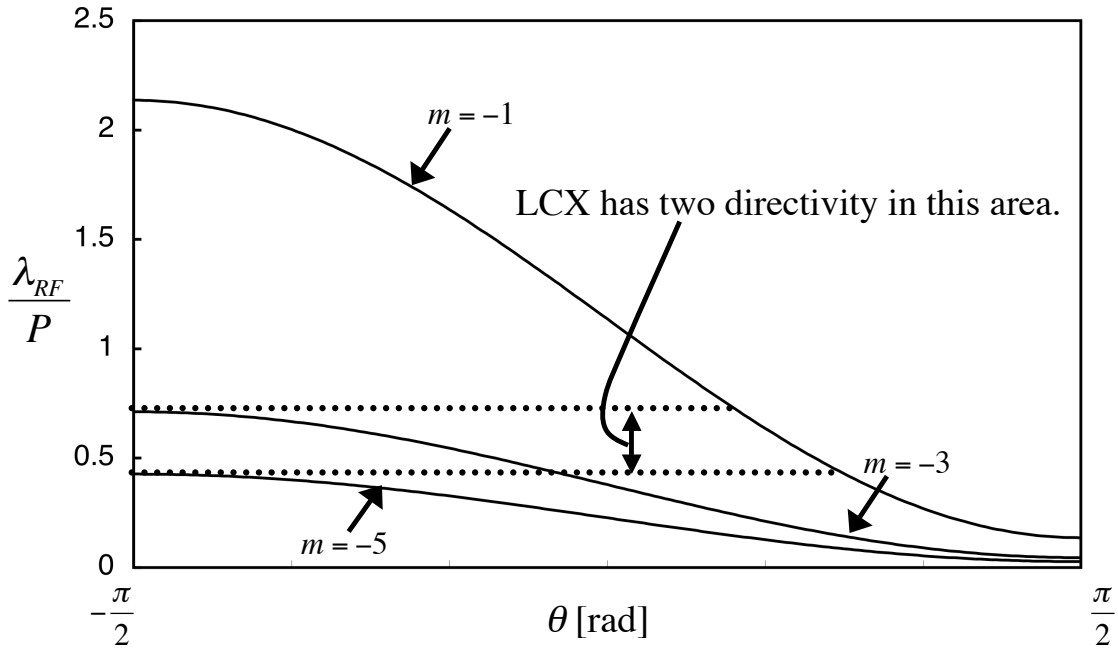


図 4.1: 電波の放射指向角度と $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ の関係

波を θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第一波, θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第二波, 終端反射後に θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第三波, 終端反射後に θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第四波と呼ぶことにする. 受信端末はそれぞれ別々の伝搬経路を経た 4 波全てあるいは 4 波のうち 3 波を受信する.

4.2.1 第一波及び第二波の伝搬経路

θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第一波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 4.2 に θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第一波の伝搬経路 (a) を示す. 給電点から漏えい同軸ケーブルに入力された信号は, ケーブル内を伝送後, 最大放射指向角度 θ_{-1} で放射される. 空間に放射された信号は, 受信端末で受信される. 漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を A_4 [m] とすると, その伝搬時間 t_{d1-v} [sec] は, 群速度 v [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{d1-v} = \frac{A_4}{v}. \quad (4.2)$$

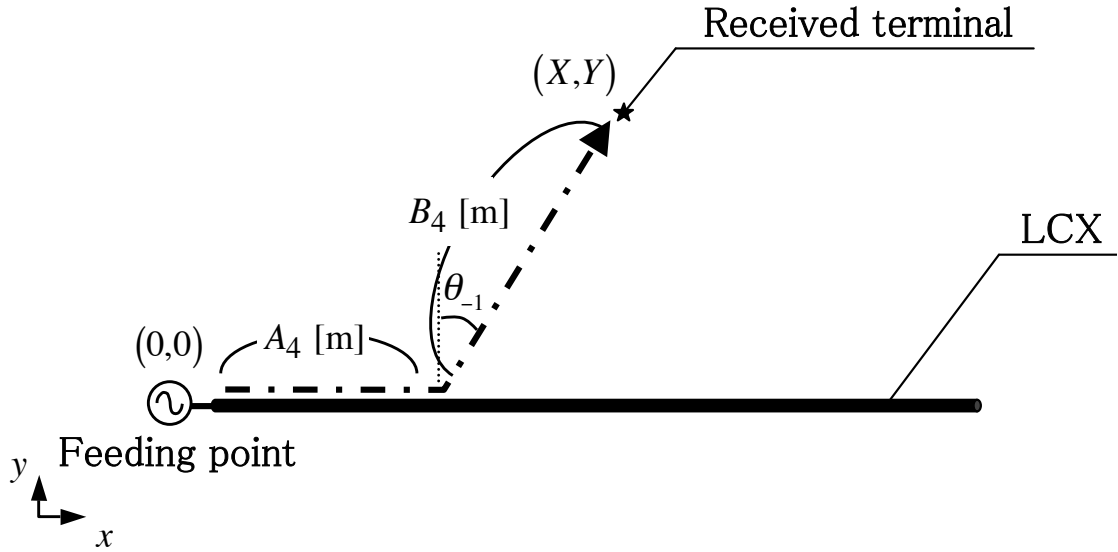


図 4.2: 第一波の伝搬経路 (a)

空間伝搬距離を $B_4[\text{m}]$ とすると, 空間伝搬時間 $t_{d1-c}[\text{sec}]$ は, 空間中の伝搬速度 $c[\text{m/s}]$ を用いて以下のように表せる.

$$t_{d1-c} = \frac{B_4}{c}. \quad (4.3)$$

よって, 到着時刻 $t_{d1}[\text{sec}]$ は以下のように表せる.

$$t_{d1} = \frac{A_4}{v} + \frac{B_4}{c}. \quad (4.4)$$

次に, θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第二波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 4.3 に θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第二波の伝搬経路 (b) を示す. 漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を $C_4[\text{m}]$ とすると, その伝搬時間 $t_{d2-v}[\text{sec}]$ は, $v[\text{m/s}]$ を用いて以下のように表せる.

$$t_{d2-v} = \frac{C_4}{v}. \quad (4.5)$$

空間伝搬距離を $D_4[\text{m}]$ とすると, 空間伝搬時間 $t_{d2-c}[\text{sec}]$ は, $c[\text{m/s}]$ を用いて以下のように表せる.

$$t_{d2-c} = \frac{D_4}{c}. \quad (4.6)$$

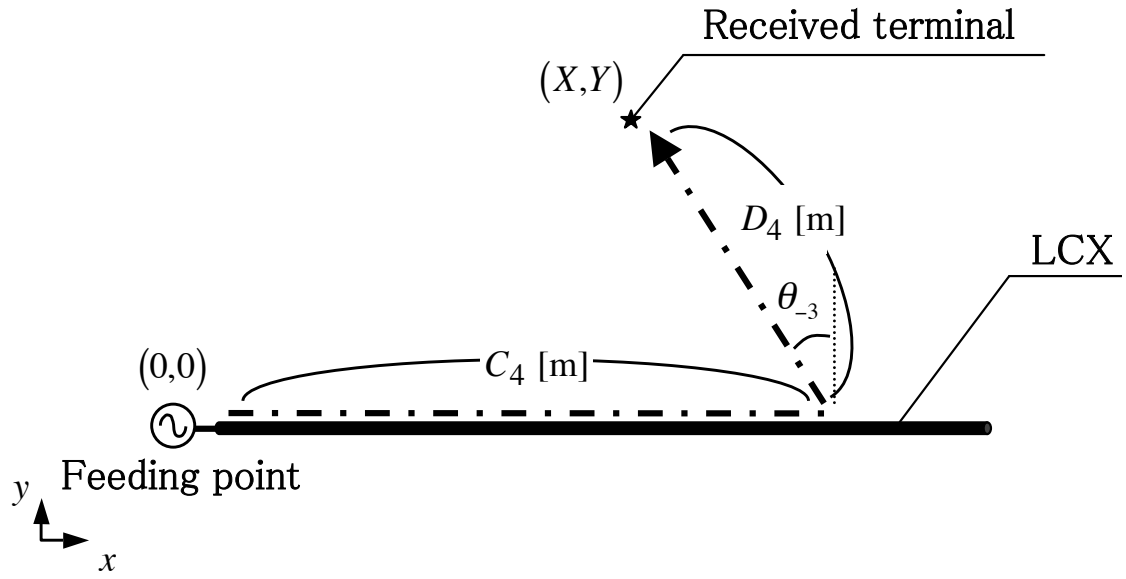


図 4.3: 第二波の伝搬経路 (b)

よって、到着時刻 $t_{d2}[\text{sec}]$ は以下のように表せる。

$$t_{d2} = \frac{C_4}{v} + \frac{D_4}{c}. \quad (4.7)$$

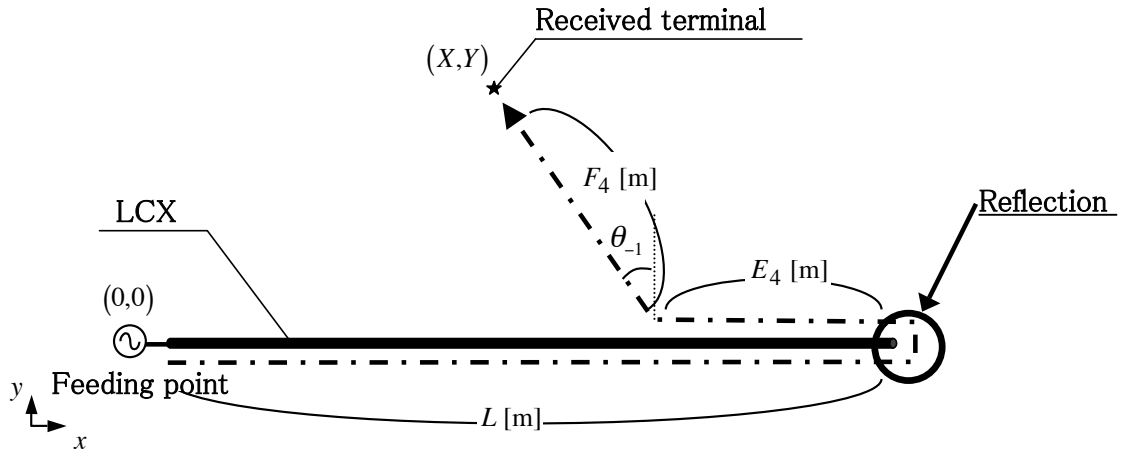


図 4.4: 第三波の伝搬経路 (c)

4.2.2 第三波及び第四波の伝搬経路

まず, θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第三波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 4.4 に θ_{-1} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第三波の伝搬経路 (c) を示す. 終端における反射を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を E_4 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{d3-v} [sec] は, v [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{d3-v} = \frac{L + E_4}{v}. \quad (4.8)$$

空間伝搬距離を F_4 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{d3-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる.

$$t_{d3-c} = \frac{F_4}{c}. \quad (4.9)$$

よって, 到着時刻 t_{d3} [sec] は以下のように表せる.

$$t_{d3} = \frac{L + E_4}{v} + \frac{F_4}{c}. \quad (4.10)$$

次に, θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第四波の伝搬経路と到着時刻について述べる. 図 4.5 に θ_{-3} の方向へ漏えい同軸ケーブルから放射される第四波の伝搬経路 (d) を示す. 終端における反射を経た後の漏えい同軸ケーブル内の伝送距離を G_4 [m] とすると, ケーブル内の伝搬時間 t_{d4-v} [sec] は, v [m/s] を用いて

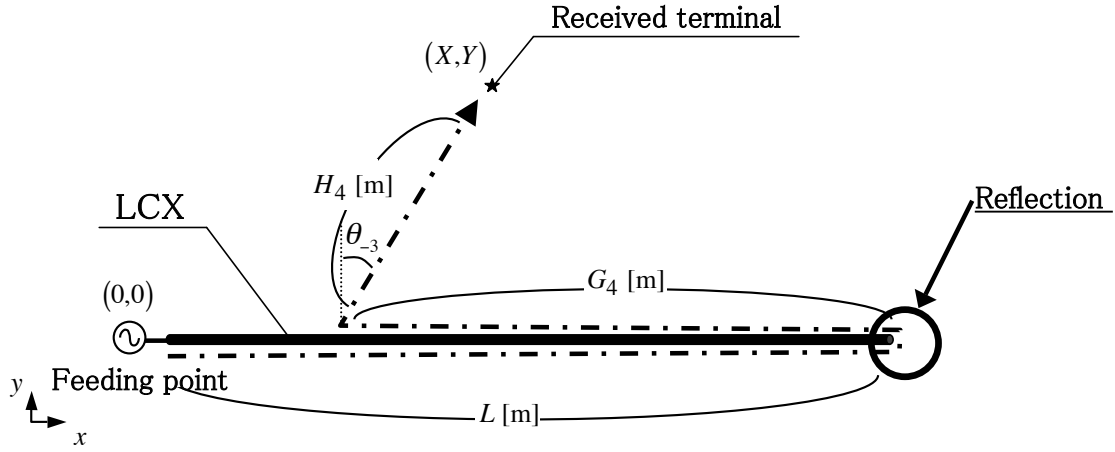


図 4.5: 第四波の伝搬経路 (d)

以下のように表せる .

$$t_{d4-v} = \frac{L + G_4}{v}. \quad (4.11)$$

空間伝搬距離を H_4 [m/s] とすると, 空間伝搬時間 t_{d4-c} [sec] は, c [m/s] を用いて以下のように表せる .

$$t_{d4-c} = \frac{H_4}{c}. \quad (4.12)$$

よって到着時刻 t_{d4} [sec] は以下のように表せる .

$$t_{d4} = \frac{L + G_4}{v} + \frac{H_4}{c}. \quad (4.13)$$

2.2.2 節で定義した xy 平面上にて漏えい同軸ケーブルと受信端末の位置を以下のようにする . 給電点の座標を $(0, 0)$ とし, L [m] の漏えい同軸ケーブルが x の正方向に向かって設置されているものとする . 受信端末の座標を (X, Y) とする, このとき $A_4 \sim H_4$ は $L, X, Y, \theta_{-1}, \theta_{-3}$ を用いて以下のように表すことができる .

$$\begin{aligned} A_4 &= X - Y \tan \theta_{-1}, \\ B_4 &= \frac{Y}{\cos \theta_{-1}}, \\ C_4 &= X - Y \tan \theta_{-3}, \\ D_4 &= \frac{Y}{\cos |\theta_{-3}|}, \\ E_4 &= L - X - Y \tan \theta_{-1}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned}
 F_4 &= \frac{Y}{\cos \theta_{-1}}, \\
 G_4 &= L - X - Y \tan \theta_{-3}, \\
 H_4 &= \frac{Y}{\cos |\theta_{-3}|},
 \end{aligned}$$

よって, $t_{d1}, t_{d2}, t_{d3}, t_{d4}$ は, それぞれ以下のようになる.

$$t_{d1} = \frac{X - Y \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos \theta_{-1}}, \quad (4.15)$$

$$t_{d2} = \frac{X - Y \tan \theta_{-3}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}, \quad (4.16)$$

$$t_{d3} = \frac{2L - X - Y \tan \theta_{-1}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos \theta_{-1}}, \quad (4.17)$$

$$t_{d4} = \frac{2L - X - Y \tan \theta_{-3}}{v} + \frac{Y}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}. \quad (4.18)$$

4.3 提案方式の原理

本節では, 4.2 節で述べた 4 つの伝搬経路と到着時刻の関係を用いて, 位置の推定式を導出する.

提案方式では, 漏えい同軸ケーブルと検出対象となる受信機との位置関係により受信する電波の伝搬経路の数が異なる. 二次元の位置座標を決定するためには, 最低限 3 つの伝搬経路を必要とするため, 受信した電波の伝搬経路の数が 2 つ以下の領域は位置検出可能領域の対象外とし, 3 つ以上となる領域を位置検出可能領域とする.

図 4.6 に, 位置検出可能領域の形状を示す. θ_{-1}, θ_{-3} のどちらが大きいかによって位置検出可能領域内で受信される伝搬経路の組み合わせが変化するため, $\theta_{-1} > |\theta_{-3}|$ の場合, $\theta_{-1} = |\theta_{-3}|$ の場合, $\theta_{-1} < |\theta_{-3}|$ の場合に分けて考える. それぞれの場合について, 位置の推定式を導出する. 図 4.7 に, 伝搬経路に基づく位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせを示す.

受信される電波の伝搬経路の組み合わせは複数あるが, いずれの組み合わせの場合でも, 受信される順番は (a)(b)(c)(d) の順である.

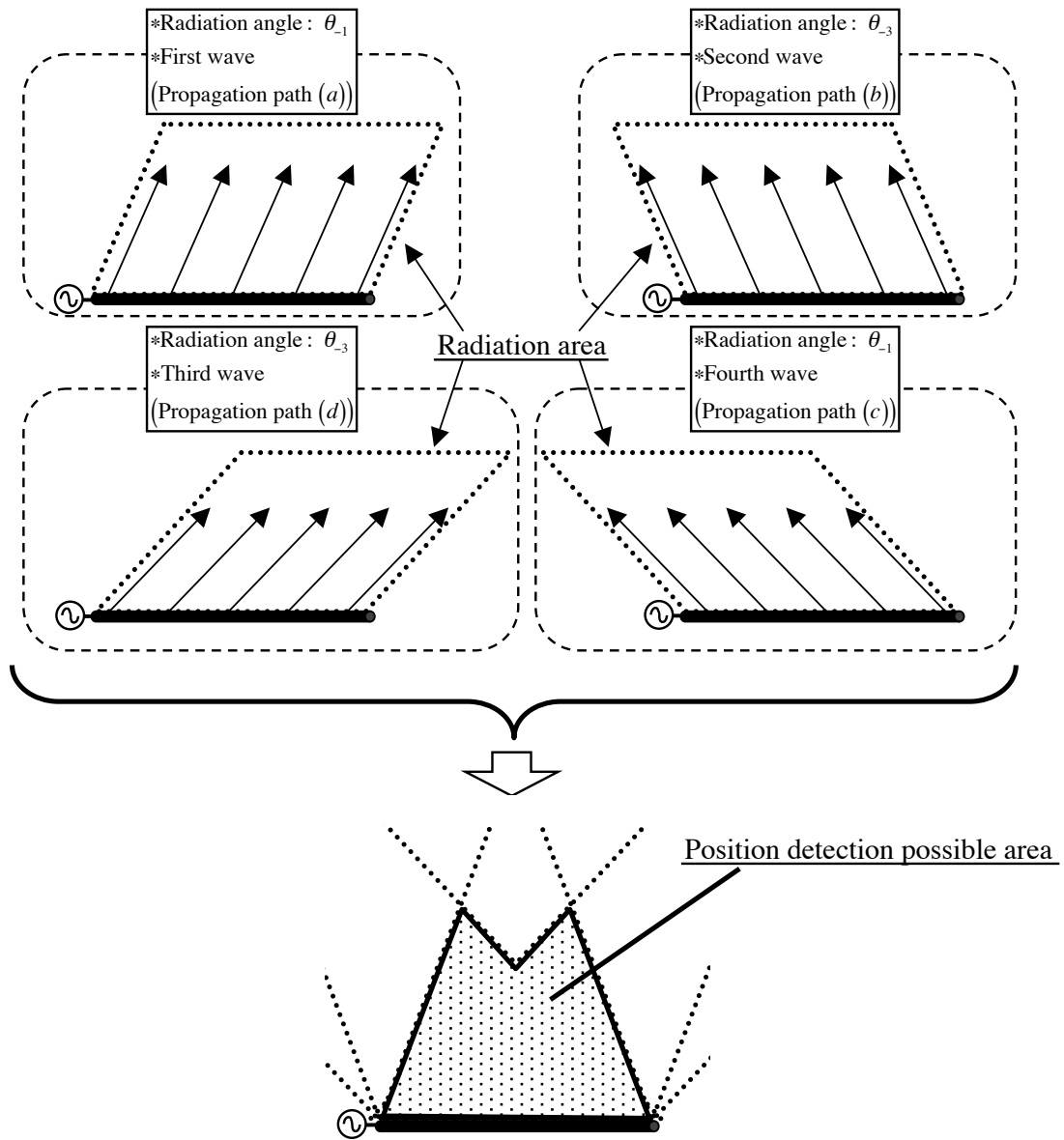


図 4.6: 位置検出可能領域の形状

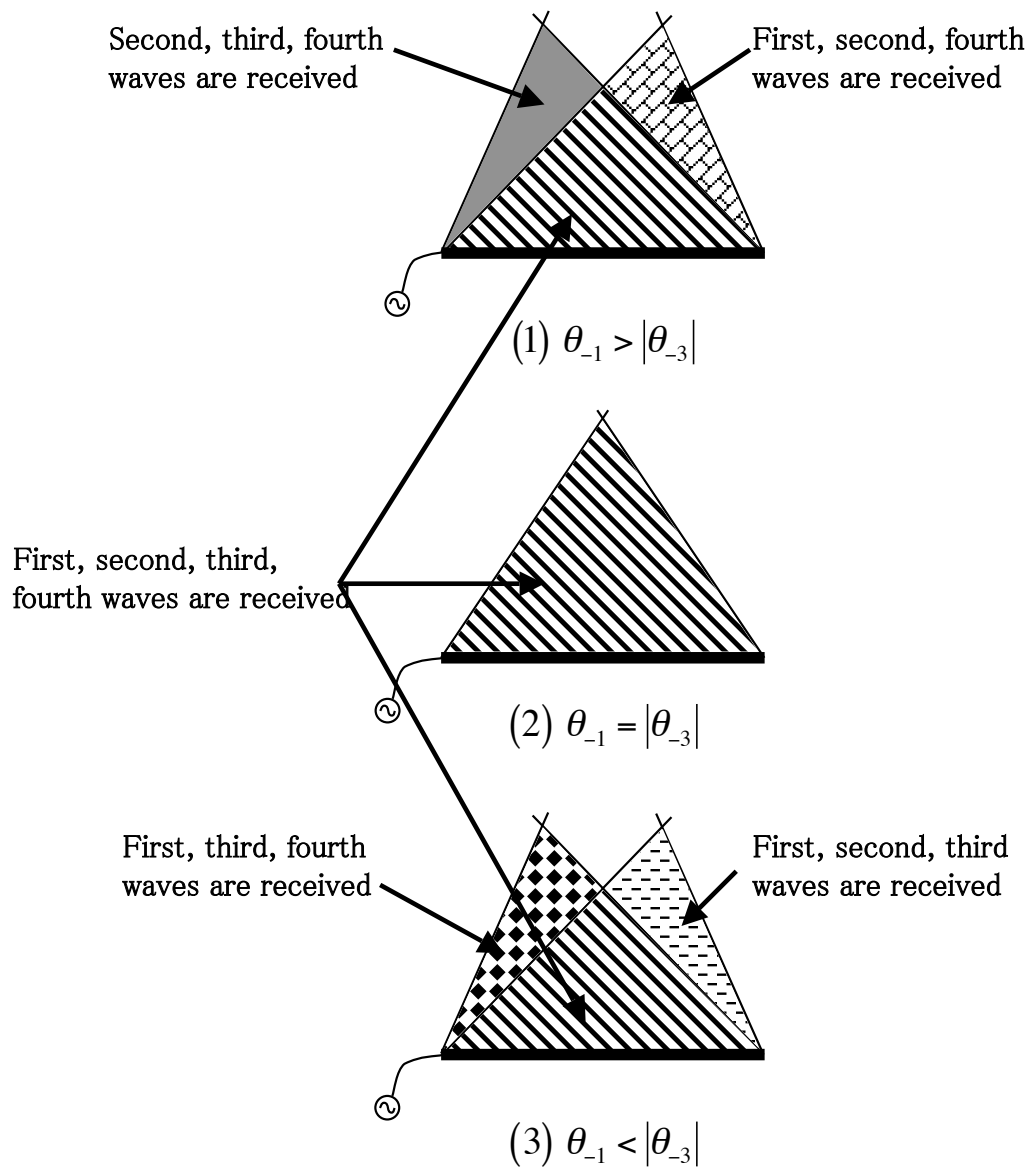


図 4.7: 位置検出可能領域と伝搬経路の組み合わせ

4.3.1 位置の推定式

- $\theta_{-1} > |\theta_{-3}|$ の場合

図4.7(1)に示すように, $\theta_{-1} > |\theta_{-3}|$ の場合には, (b)(c)(d), (a)(b)(d), (a)(b)(c)(d) が受信される領域で位置検出が可能となる.

(b)(c)(d)を受信する領域では, 一つ目の波(第二波)と二つ目の波(第三波)の到着時刻差 $\Delta_{d23} = t_{d3} - t_{d2}$, 一つ目の波(第二波)と三つ目の波(第四波)の到着時刻差 $\Delta_{d24} = t_{d4} - t_{d2}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下ようになる.

$$\tilde{X} = L - \Delta_{d24} \cdot \frac{v}{2}, \quad (4.19)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{d24} - \Delta_{d23}}{\frac{\tan \theta_{-3} - \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} + \frac{1}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}}. \quad (4.20)$$

(a)(b)(d)を受信する領域では, 一つ目の波(第一波)と二つ目の波(第二波)の到着時刻差 $\Delta_{d12} = t_{d2} - t_{d1}$, 一つ目の波(第一波)と三つ目の波(第四波)の到着時刻差 $\Delta_{d14} = t_{d4} - t_{d1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下ようになる.

$$\tilde{X} = L - (\Delta_{d14} - \Delta_{d12}) \cdot \frac{v}{2}, \quad (4.21)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{d12}}{\frac{\tan \theta_{-3} - \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} + \frac{1}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}}. \quad (4.22)$$

(a)(b)(c)(d)を受信する領域では, 一つ目の波(第一波)と二つ目の波(第二波)の到着時刻差 $\Delta_{d12} = t_{d2} - t_{d1}$, 一つ目の波(第一波)と三つ目の波(第三波)の到着時刻差 $\Delta_{d13} = t_{d3} - t_{d1}$, 一つ目の波(第一波)と四つ目の波(第四波)の到着時刻差 $\Delta_{d14} = t_{d4} - t_{d1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下ようになる.

$$\tilde{X} = L - \Delta_{d13} \cdot \frac{v}{2}, \quad (4.23)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{d12}}{\frac{\tan \theta_{-3} - \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} + \frac{1}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}}. \quad (4.24)$$

- $\theta_{-1} = |\theta_{-3}|$ の場合

図4.7に示すように, $\theta_{-1} = |\theta_{-3}|$ の場合には, 3波が受信される領域は存在せず, (a)(b)(c)(d)が受信される領域でのみ位置検出が可能となる. 位置推定式は式(4.23), 式(4.24)を用いる.

- $\theta_{-1} < |\theta_{-3}|$ の場合

図 4.7 に示すように, $\theta_{-1} < |\theta_{-3}|$ の場合には, (a)(b)(c), (a)(c)(d), (a)(b)(c)(d) が受信される領域で位置検出が可能となる.

(a)(b)(c) を受信する領域では, 一つ目の波 (第一波) と二つ目の波 (第二波) の到着時刻差 $\Delta_{d12} = t_{d2} - t_{d1}$, 一つ目の波 (第一波) と三つ目の波 (第三波) の到着時刻差 $\Delta_{d13} = t_{d3} - t_{d1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下ようになる.

$$\tilde{X} = L - \Delta_{d13} \cdot \frac{v}{2}, \quad (4.25)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{d12}}{\frac{\tan \theta_{-3} - \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} + \frac{1}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}}. \quad (4.26)$$

(a)(c)(d) を受信する領域では, 一つ目の波 (第一波) と二つ目の波 (第三波) の到着時刻差 $\Delta_{d13} = t_{d3} - t_{d1}$, 一つ目の波 (第一波) と三つ目の波 (第四波) の到着時刻差 $\Delta_{d14} = t_{d4} - t_{d1}$ を用いると, 推定位置座標 (\tilde{X} \tilde{Y}) は以下ようになる.

$$\tilde{X} = L - \Delta_{d13} \cdot \frac{v}{2}, \quad (4.27)$$

$$\tilde{Y} = \frac{\Delta_{d14} - \Delta_{d13}}{\frac{\tan \theta_{-3} - \tan \theta_{-1}}{v} - \frac{1}{c \cdot \cos \theta_{-1}} + \frac{1}{c \cdot \cos |\theta_{-3}|}}. \quad (4.28)$$

(a)(b)(c)(d) を受信する領域では, 位置推定式は式 (4.23), 式 (4.24) を用いる.

4.3.2 伝搬経路の特定

受信波の伝搬経路の特定方法について述べる. 4 波受信されれば, 受信波の伝搬経路は受信した順番に (a)(b)(c)(d) と決定される. しかしながら, 3 波が受信された場合, 受信波の伝搬経路を特定する必要がある. 伝搬経路の特定のために, 図 4.8 のように十分長い同軸ケーブルを終端に接続する. 同軸ケーブルの長さを LEN_2 [m] とする. Δ_{c13} は第三波の伝搬距離が LEN_2 だけ長くなるため, $\frac{LEN_2}{v}$ 増加する. Δ_{c23} , Δ_{c24} は, それぞれ $\frac{LEN_2}{v}$, $\frac{LEN_2}{v}$ 増加する. LEN_2 が十分長いとき, 以下の式が成り立つ.

$$\Delta_{c12} < \frac{LEN_2}{v}, \quad (4.29)$$

$$\Delta_{c13} > \frac{LEN_2}{v}, \quad (4.30)$$

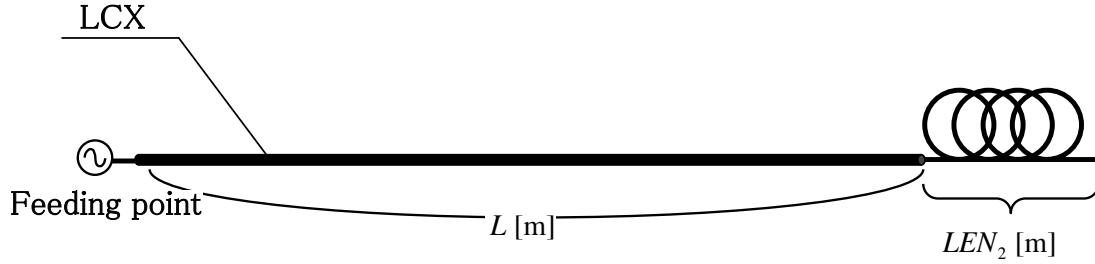


図 4.8: 伝搬経路特定のための同軸ケーブルの接続

$$\Delta_{c23} > \frac{LEN_2}{v}, \quad (4.31)$$

$$\Delta_{c24} > \frac{LEN_2}{v}, \quad (4.32)$$

$$\Delta_{c34} < \frac{LEN_2}{v}. \quad (4.33)$$

つまり，一番目の受信波と二番目の受信波の到着時刻差を t_C ，二番目の受信波と三番目の受信波の到着時刻差を t_D とすると

- (a)(b)(c) の 3 波の受信領域

$$\theta_{-1} < |\theta_{-3}|, \quad (4.34)$$

$$t_C < t_D, \quad (4.35)$$

の場合，(a)(b)(c) の 3 波の受信領域となり，受信した順番に (a)(b)(c) と決定される。

- (a)(b)(d) の 3 波の受信領域

$$\theta_{-1} > |\theta_{-3}|, \quad (4.36)$$

$$t_C < t_D, \quad (4.37)$$

の場合，(a)(b)(d) の 3 波の受信領域となり，受信した順番に (a)(b)(d) と決定される。

- (a)(c)(d) の 3 波の受信領域

$$\theta_{-1} < |\theta_{-3}|, \quad (4.38)$$

$$t_C > t_D, \quad (4.39)$$

の場合, (a)(c)(d) の 3 波の受信領域となり, 受信した順番に (a)(c)(d) と決定される.

- (b)(c)(d) の 3 波の受信領域

$$\theta_{-1} > |\theta_{-3}|, \quad (4.40)$$

$$t_C > t_D, \quad (4.41)$$

の場合, (b)(c)(d) の 3 波の受信領域となり, 受信した順番に (b)(c)(d) と決定される.

なお, 接続する余長の長さ LEN_2 は $LEN_2 \geq 2L$ を満たす必要がある. これは, $LEN_2 < 2L$ の場合, 式 (4.29) ~ 式 (4.33) が成り立たないため, t_C, t_D を用いた判別ができないが, $LEN_2 \geq 2L$ の場合, 判別が可能であるためである.

4.4 位置検出可能領域面積の評価

図 4.7 に示した伝搬経路に基づく位置検出可能領域の面積は, スロット周期 P と空間中の波長 λ_{RF} に依存する漏えい同軸ケーブルの放射指向角度 θ_{-1}, θ_{-3} の値によって変化する.

放射指向角度 θ_{-1}, θ_{-3} の値によって漏えい同軸ケーブルから放射される電波が強め合う領域の重なり具合が変化するため, 面積の求め方は放射指向角度 θ_{-1}, θ_{-3} の値に依存して図 4.7 のように変化する. 以下に位置検出可能領域面積 $S[\text{m}^2]$ を求める式を, θ_{-1}, θ_{-3} で場合分けして記述する. ただし, 漏えい同軸ケーブルの一辺の長さは $L[\text{m}]$ とする.

$\theta_{-1} \geq |\theta_{-3}|$ の場合, 位置検出可能領域面積 S は以下ようになる.

$$S = \frac{L^2}{\tan \theta_{-1} + \tan |\theta_{-3}|} - \frac{L^2}{4 \tan \theta_{-1}}. \quad (4.42)$$

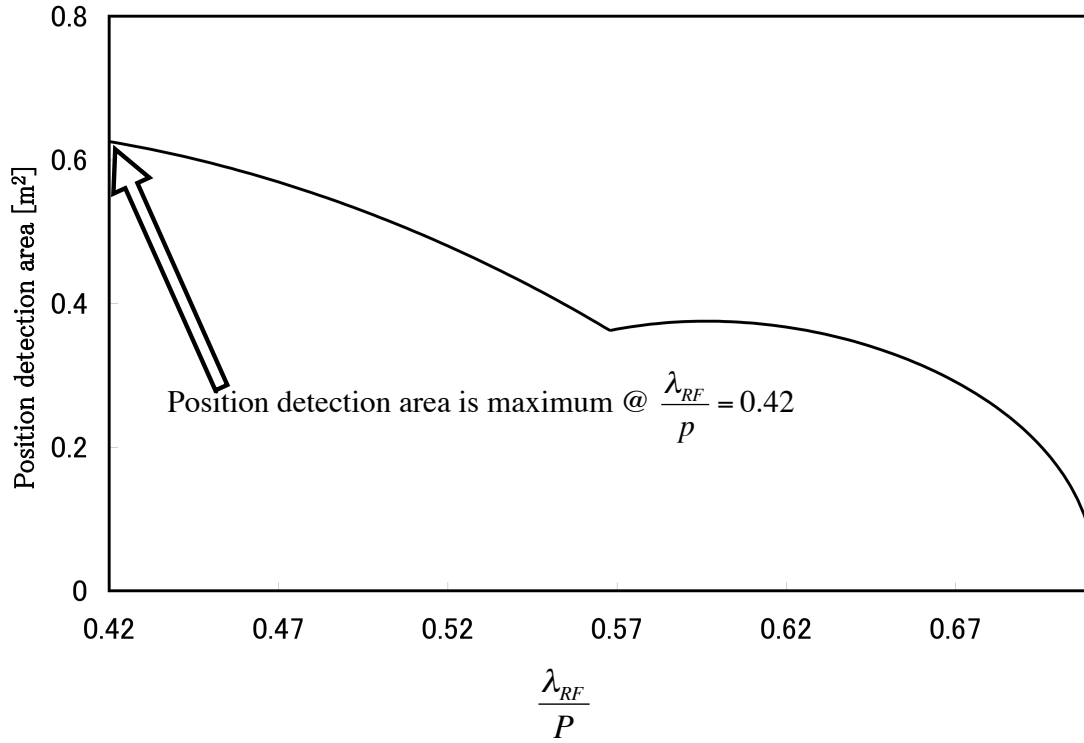


図 4.9: $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ と位置検出可能領域面積の関係

$\theta_{-1} < |\theta_{-3}|$ の場合，位置検出可能領域面積 S は以下ようになる．

$$S = \frac{L^2}{\tan \theta_{-1} + \tan |\theta_{-3}|} - \frac{L^2}{4 \tan |\theta_{-3}|}. \quad (4.43)$$

図 4.9 は，漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つ $0.427 \leq \frac{\lambda_{RF}}{P} \leq 0.712$ の条件のもとで，式 (4.42)，式 (4.43) から計算した $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ と位置検出可能領域の面積の関係を示す． $\frac{\lambda_{RF}}{P} = 0.42$ のとき，位置検出可能領域の面積 S が，最大となることが分かる．このことから，二方向に指向性を持つという条件のもとでは， $\frac{\lambda_{RF}}{P} = 0.42$ ときに，位置検出可能領域が最大となり，最も広い範囲で位置検出が可能であることが明らかになった．

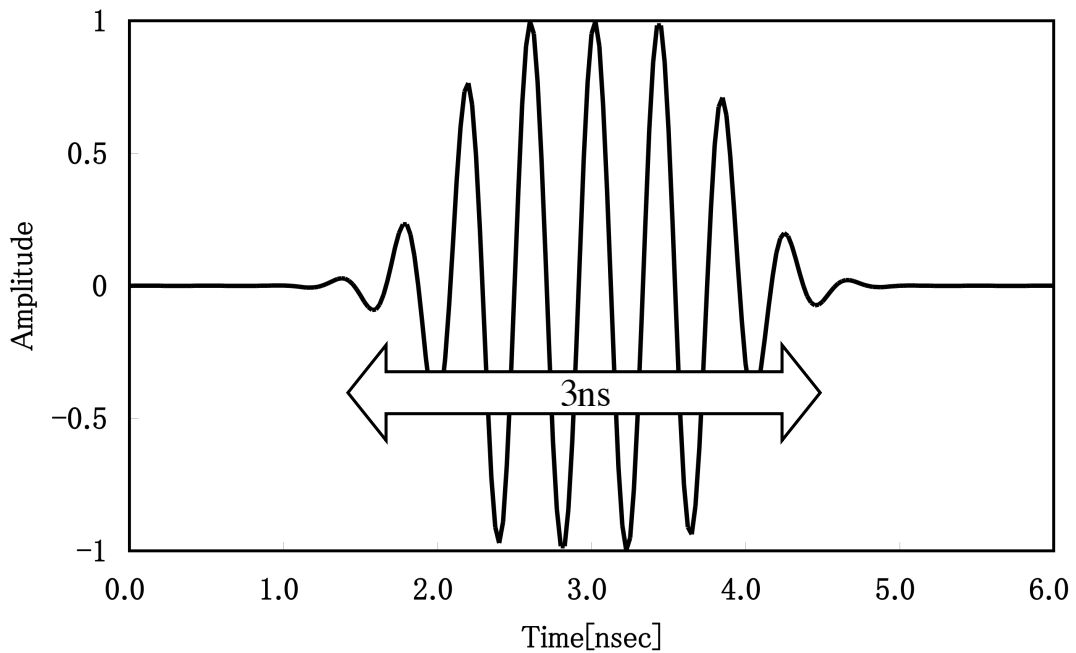


図 4.10: 入力信号波形

4.5 位置検出誤差のシミュレーション評価

本節では、二方向指向性漏えい同軸ケーブルの放射電波についてシミュレーションを行い、漏えい同軸ケーブルとオムニアンテナ間の時間軸上での伝搬路特性を求める。シミュレーションには二次元 FDTD 法 [80]-[82] を用いる。

4.5.1 シミュレーション諸元

シミュレーションでは各スロットを点波源とみなす。点波源とみなす各スロットから放射される電波は、給電点から各スロットまでの距離の伝搬時間分遅れて放射される。図 4.10 に入力信号の波形を示す。受信端末で得られる受信信号の時間波形から、電波の到着時刻を検出するため、図のようなガウスパルスとした。また、 $m = -3$ のモードの放射波を発生させるためには、信号長が 4 周期以上必要であるため信号の幅は約 3 ns とした。点波源とみなす各スロットでは、 xy 平面に対して垂直な z 軸方向の電界 E_z を、図 4.10 のような波形で与える。 $E_z(t)$ は以下の式で与えられる。

$$E_z(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) \exp\left(\frac{t - (t_l - 1 \times 10^{-9})}{0.6 \times 10^{-9}}\right)^2, & (t < t_l - 1 \times 10^{-9}) \\ \sin(2\pi ft), & (t_l - 1 \times 10^{-9} \leq t \leq t_l + 1 \times 10^{-9}) \\ \sin(2\pi ft) \exp\left(\frac{t - (t_l + 1 \times 10^{-9})}{0.6 \times 10^{-9}}\right)^2, & (t_l + 1 \times 10^{-9} < t) \end{cases} \quad (4.44)$$

給電点から該当スロットまでの距離を l_s とすると, t_l は, 給電点から該当スロットまでの伝搬時間であり, $t_l = \frac{l_s}{v}$ となる.

表 4.1: FDTD 法のシミュレーション諸元

時間ステップ幅	0.025 [ns]
x 方向 セルサイズ	0.0122 [m]
y 方向 セルサイズ	0.0122 [m]
波長 (λ_{RF})	0.125 [m]
スロット周期 (P)	0.22 [m]
測定ポイント間隔	0.122 [m]
漏えい同軸ケーブルの長さ (L)	4.96 [m]
周波数 (L)	2.4 [GHz]

表 4.1 に二次元 FDTD 法を用いるときのシミュレーション諸元を示す。図 4.11 にシミュレーションにおける座標配置を示す。給電点の位置座標が $(0.36m, 0.36m)$ 、漏えい同軸ケーブルの終端の位置座標が $(5.32m, 0.36m)$ となるように 4.96m の漏えい同軸ケーブルを配置した。 z 軸方向の電界 E_z 、 x 軸方向の磁界 H_x 、 y 軸方向

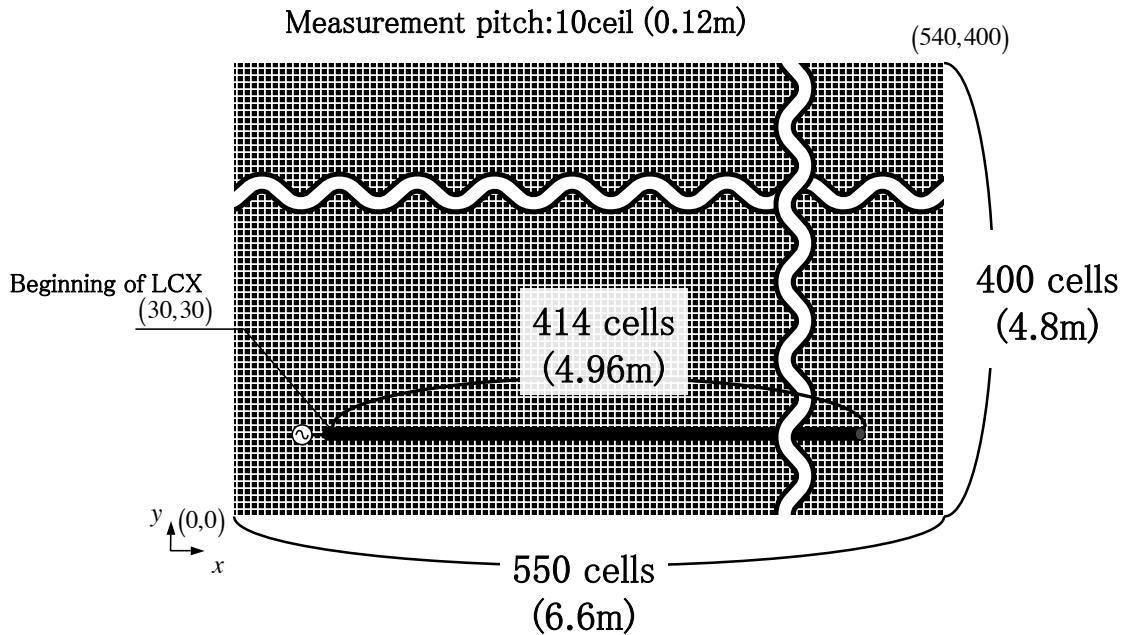


図 4.11: シミュレーションにおける座標配置

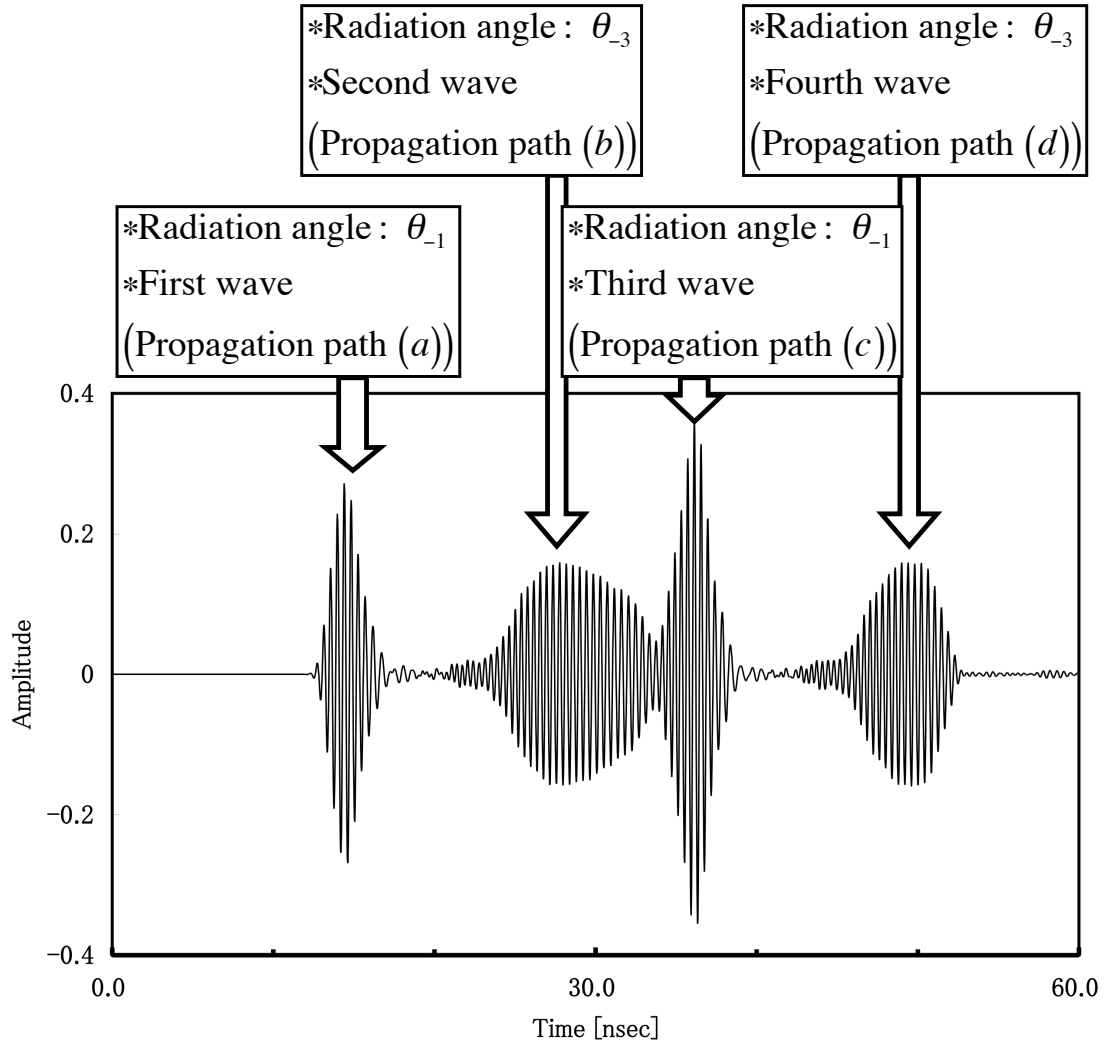


図 4.12: 伝搬路応答例

の磁界 H_y を用い，二次元 FDTD によるシミュレーションを行った．

4.5.2 シミュレーション結果

本節では，FDTD 法によるシミュレーションの結果を示す．図 4.12 にシミュレーションで得られた， E_z の時間軸上での伝搬路応答例を示す．図 4.12 は，位置座標 $(4.25m, 5.5m)$ で得られた伝搬路応答であり，4 つのパルスは伝搬経路 (a) ~ (d) を経た電波である．一番目のパルスは第一波が伝搬経路 (a) を経て受信され，二番目のパルスは第二波が伝搬経路 (b) を経て受信され，三番目のパルスは第三波が伝搬経

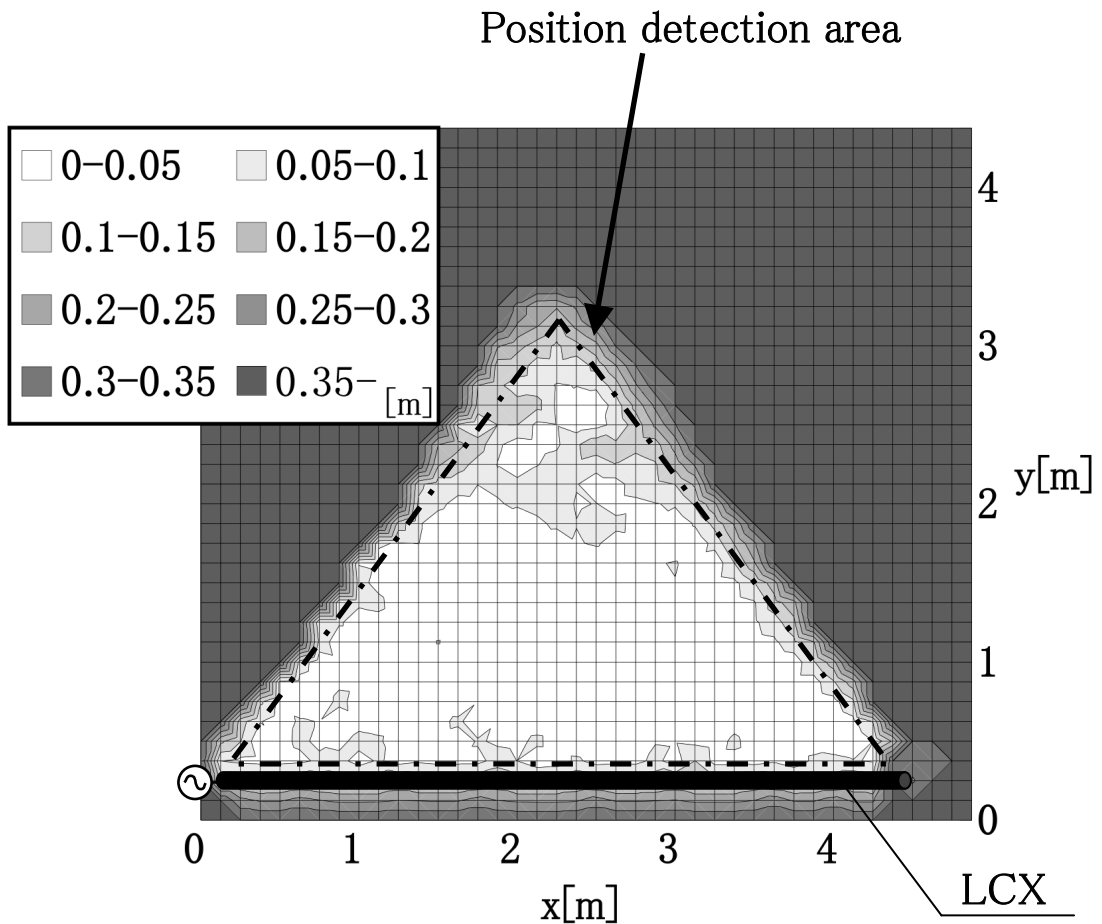


図 4.13: 位置検出誤差の分布

路 (c) を経て受信され，四番目のパルスは第四波が伝搬経路 (d) を経て受信されたことを示している．一番目のパルスの幅と三番目のパルスの幅を比較すると一番目のパルスの幅の方が狭い．これは，放射指向角度 θ_{-1} の方向へ放射された電波は， P 離れたスロットから放射された電波と 1 周期のずれのみであるため信号が密であるのに対して，放射指向角度 θ_{-3} の方向へ放射された電波は， P 離れたスロットから放射された電波と 3 周期のずれがあるため信号が疎になる．このため一番目のパルスの幅の方が狭い．一番目のパルスの振幅が三番目のパルスの振幅より大きいことの理由も同じである．

図 4.13 は，位置検出誤差の分布である．シミュレーションではしきい値を用いて信号パルスが存在する時刻を推定した．そのためパルスが重なったり電界強度が小

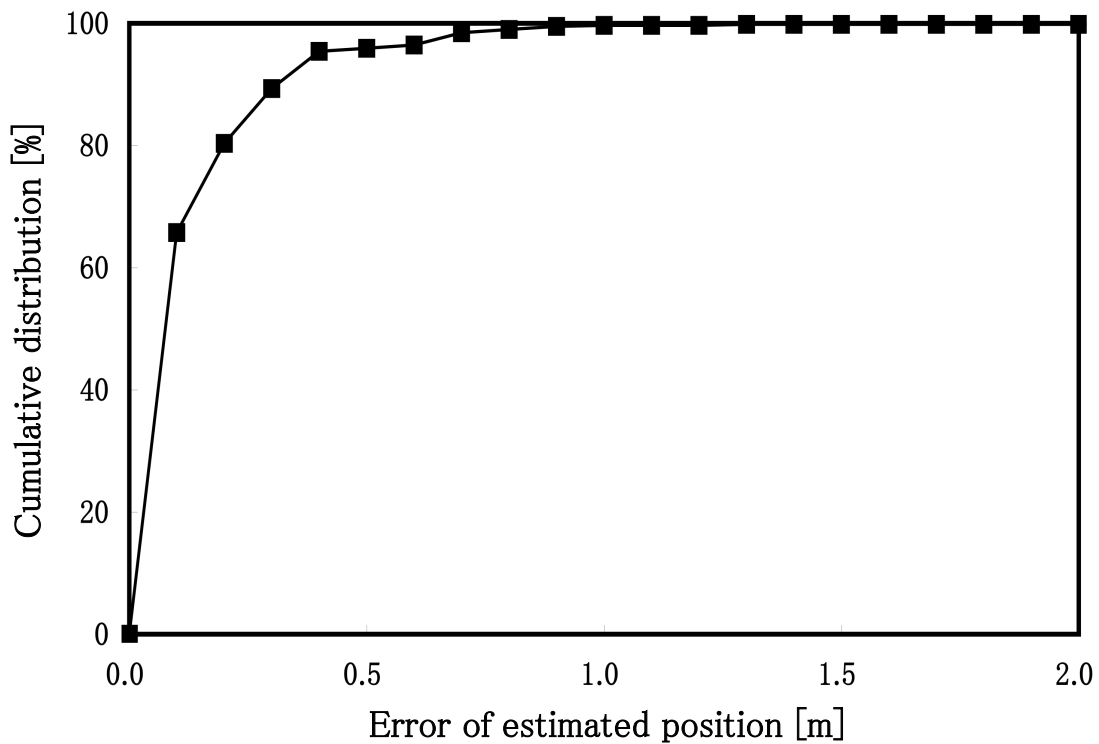


図 4.14: 誤差の累積分布

さい場所では、パルスの存在時刻の推定に誤差が生じ、位置検出誤差が発生した。シミュレーションによって、4つの電波が受信できたため、原理の適用が可能であり、位置検出可能領域内の誤差が1.0m以下となったことから、位置検出可能であることが分かった。漏えい同軸ケーブルに近い地点では、ピーク分離ができないため位置検出が不可能である領域が存在する。次に位置検出可能領域内における、誤差の累積分布を求めた。図4.14に誤差の累積分布のグラフを示す。本章で提案した位置検出方式では誤差1m以下となった領域は、位置検出可能領域内の面積の96%を占めた。

4.6 結言

本章では、第3章とは異なり、二方向に放射指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用いて、送信機と受信機の時計を同期させる必要のない方式を提案した。二方向に放射指向性を持つ漏えい同軸ケーブルを用いて、反射を経ない2波と反射を経る2波を発生させ、これら4波のTDOAを用いて、位置検出を可能としている。漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件を明らかにした。さらにFDTD法を用いたシミュレーションにより給電点と受信アンテナ間の4波の伝搬路応答を導出した。シミュレーションにより4波が受信できたことで、位置検出原理が位置検出可能であることを確認すると共に、位置検出可能領域の面積について評価し、 $\lambda_{RF}/P = 0.42$ のときに面積が最大となることを明らかにした。位置検出誤差の評価を行った結果、位置検出可能領域内の96%が誤差1m以下となることを明らかにした。

第5章 結論

本論文は、漏えい同軸の無線位置検出応用に関する研究成果をまとめたものである。以下に、本研究で得られた成果を総括する。

第2章では、漏えい同軸ケーブルから放射される電波の到着時刻 (TOA:Time Of Arrival) と信号受信強度 (RSSI:Received Signal Strength Indicator) を組み合わせた二次元位置検出方式と漏えい同軸ケーブルの終端反射を用いた TOA 二次元位置検出方式の2種類の位置検出方式の提案を行った。両方式について、位置検出実験を行い、位置検出原理の実証と誤差を評価した結果、以下のことを明らかにした。

- TOA と RSSI を組み合わせた位置検出方式では、位置検出可能領域内において、誤差が 1m 以下となる面積が約 64 %となることを実験的検討により確認した。
- 終端反射を用いた TOA 位置検出方式では、検出可能領域内で誤差が 1m 以下となる面積が約 97 %となることを実験的検討により確認した。

第3章では、屈曲配置した漏えい同軸ケーブルで、終端で信号を反射させることによる4波を用いた到着時刻差 (TDOA:Time Difference Of Arrival) 二次元位置検出方式の提案を行った。検出可能領域の面積の評価と位置検出の原理の実証実験を行い、位置検出誤差を評価した結果、以下のことを明らかにした。

- 終端反射と屈曲配置を用いた TDOA 位置検出方式における検出可能領域の面積を理論的に導出し、位置検出可能領域面積を最大とする放射指向角度を明らかにした。
- 位置検出可能領域内で誤差が 1m 以下となる面積が約 89 %となることを実験的検討により確認した。

第4章では、電波周波数に対して、漏えい同軸ケーブルのスロット周期 P を選択すれば、漏えい同軸ケーブルから二方向に電波を放射させることができることに着目し、さらに終端で電波を終端反射させることで、4つの電波を放射させ、それらを用いる TDOA 二次元位置検出方式の提案を行った。理論解析により検出可能面

積を導出し, FDTD法を用いたシミュレーションによる位置検出誤差の評価を行った結果, 以下のことを明らかにした.

- 漏えい同軸ケーブルが二方向に指向性を持つための条件 $0.427 \leq \frac{\lambda_{RF}}{P} \leq 0.712$ を示した.
- 検出可能領域の面積を最大にする, $\frac{\lambda_{RF}}{P}$ が存在することを明らかにした.
- 検出可能領域内で誤差が 1m 以下となる面積が約 96 % となることを明らかにした.

本論文で提案したいずれの二次元位置検出方式も, 1つの漏えい同軸ケーブル, 1つの信号発生源という簡単な構成で, 二次元の位置検出が可能であり, また, 漏えい同軸ケーブルの長さを延ばすことによって, 基地局増設を伴うことなく容易に位置検出可能領域を増大することが可能であるという従来方式に無い優れた特徴を有している. 従って, 既に敷設されている漏えい同軸ケーブルに適用するなど, 室内や地下街といった場所への適用が期待される.

参考文献

- [1] 社団法人 電気通信事業者協会 (TCA), 携帯電話・PHS 契約数,
<http://www.tca.or.jp/database/> . (最終アクセス: 2010 年 1 月 12 日)
- [2] 立川敬二, “W-CDMA 移動通信方式,” 第 3 章, 丸善, 2001.
- [3] 服部武, 藤岡雅宣, 改訂版 ワイヤレス・ブロードバンド教科書 3.5G/次世代モバイル編, インプレス ネットビジネスカンパニー, 2006.
- [4] 根日屋英之, “小川真紀, ユビキタス無線デバイス,” 第 1 章, 東京電気大学出版局, 2005.
- [5] 宇佐美光雄, 山田純, ユビキタス技術 IC タグ, オーム社, 2005.
- [6] ブレント・ミラー, チャットシック・ビスディキアン, 清野幹雄, Bluetooth テクノロジーへの招待, ピアソンエデュケーション, 2002.
- [7] 阪田史郎 (編), 田中成興, 西室洋介, 川崎光博, 福井潔, ユビキタスネットワーキングフォーラム センサーネットワーク部会 (著), “Zigbee センサーネットワーク 通信基盤とアプリケーション,” 第 6 章 ~ 第 10 章, 秀和システム, 2005.
- [8] 阪田史郎, “ワイヤレス・ユビキタス 高速無線 LAN/UWB/3.5G 携帯電話,” 第 3 章, 秀和システム, 2004.
- [9] 阪田史郎, UWB/ワイヤレス USB 教科書, インプレス ネットビジネスカンパニー, 2006.
- [10] 松尾憲一, スペクトラム拡散技術のすべて -CDMA から IMT-2000 , Bluetooth まで-, 東京電気大学出版局, 2002.
- [11] 杉浦彰彦, “ワイヤレスネットワークの基礎と応用,” 第 5 章 ~ 第 8 章, CQ 出版株式会社, 2003.
- [12] 大友功, 小園茂, 熊澤弘之, “ワイヤレス通信工学,” 第 4 章, コロナ社, 1995.
- [13] 服部武, 藤岡雅宣, “改訂三版 ワイヤレス・ブロードバンド教科書 高速 IP ワイヤレス編,” 第 3 章, インプレス R&D, 2008.

- [14] Gartner Inc, Gartner Newsroom, “Gartner Says Worldwide Mobile Phone Sales Declined 6 Per Cent and Smartphones Grew 27 Per Cent in Second Quarter of 2009,” August 2009.
<http://www.gartner.com/it/products/newsroom/index.jsp> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [15] 株式会社BCN, プレスリリース, “ノートPCの販売金額が2ケタ減に、ネットブックの台頭で変わる市場構造,” July 2009.
<http://www.bcn.co.jp/press/index.html> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [16] 日本通信株式会社, bモバイルとは,
<http://www.bmobile.ne.jp/personal/base/index.html> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [17] 東海旅客鉄道株式会社, 車内インターネット接続サービス,
<http://railway.jr-central.co.jp/wireless/index.html> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [18] 岩永伸理, 千田晴康, 越馬淳, 久保博嗣, “東海道新幹線デジタル列車無線システム,” 三菱電機技報, pp.367-370, June 2009.
- [19] 杉浦哲広, 上田靖史, 中岡正喜, “東海道新幹線 N700 系列車内インターネット用無線 LAN アクセスポイント,” 三菱電機技報, pp.371-375, June 2009.
- [20] 野口哲也, 今井誠治, 一柳和弘, 工藤憲司, 西岡祥寛, “新幹線列車内への無線 LAN の適用に関する検討,” 信学ソ大, pp.614, September 2005.
- [21] SECOM, GPS による位置情報・現場急行サービス「ココセコム」,
<http://www.855756.com/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [22] 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ, イマドコサーチ,
<http://www.nttdocomo.co.jp/service/safety/imadoco/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [23] 日立電子サービス株式会社, 流通・物流 RFIDソリューション,
<http://systemnavi.e-densa.com/solution/DistributionRFID/index.html> . (最終アクセス: 2010年1月12日)

- [24] トランジスタ技術編集部 (編), “GPS のしくみと応用技術,” 第 1 章 ~ 第 4 章, CQ 出版株式会社, 2009.
- [25] 横山重明, 吉川忠久, “1・2 陸技無線受験教室 2 無線工学 A,” 第 6 章, 東京電気大学出版局, 2002.
- [26] 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電気大学出版局, 2003.
- [27] 佐田達典, GPS 測量技術, オーム社, 2003.
- [28] 株式会社日立製作所 ワイヤレスインフォベンチャーカンパニー, 無線 LAN 位置検知システム日立 AirLocation™II,
<http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/airlocation/index.html> . (最終アクセス: 2010 年 1 月 12 日)
- [29] 木下泰三, “無線 LAN 測位システム,” 計測技術, pp.25-29, January 2008
- [30] 三瓶政一, デジタルワイヤレス伝送技術, 第 2 章, ピアソンエデュケーション, 2002.
- [31] 中川正雄, 大槻知明, “モバイルコミュニケーション,” 第 2 章, コロナ社, 2009.
- [32] Theodore S. Rappaport, 山本平一 (監修), 小牧省三, 斎藤洋一, 小川英一, “デジタル移動通信,” 第 4 章 ~ 第 5 章, 科学技術出版, 2002.
- [33] 虫明康人, “アンテナ・電波伝搬,” 第 11 章 ~ 第 13 章, コロナ社, 1961.
- [34] 谷口慶治, “アンテナと電波伝搬,” 第 5 章, 共立出版, 2006.
- [35] ITU-R, Recommendation P1238, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz,” 1999.
- [36] ITU-R, Recommendation P.1411, “Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz,” 1999.
- [37] Ekahau Inc, Wi-Fi based RTLS tracking and communication solutions,
<http://www.ekahau.com/> . (最終アクセス: 2010 年 1 月 12 日)

- [38] 川端学, 朝生雅人, 斎川貴彦, 服部武, “セルラーシステムにおける最ゆう推定法に基づく TDOA システムの位置検出性能評価,” 信学論 (B), vol.J87-B, no.2, pp.285-291, February 2004.
- [39] 朝生雅人, 服部武, “セルラシステムにおける到来時間差と電界強度を用いたハイブリッド最ゆう位置検出方式,” 信学論 (B), vol.J92-B, no.1, pp.312-319, January 2009.
- [40] 高島雅弘, 趙大鵬, 柳原健太郎, 福井潔, 福永茂, 原晋介, 北山研一, “センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定,” 信学論 (B), vol.J89-B, no.5, pp.742-750, May 2006
- [41] 寺阪圭司, 東桂木謙治, 松波勲, 梶原昭博, “UWB-IR による屋内侵入者検知に関する検討,” 信学論 (B), vol.J90-B, no.1, pp.97-100, January 2007
- [42] 森谷潤一郎, 長谷川孝明, “逆 GPS 方式位置特定システムの一検討,” 信学技報, 情報理論, vol.102, no.742, pp.129-133, March 2003.
- [43] 水垣健一, “UWB-IR 無線方式による屋内位置検知,” 電子情報通信学会誌, vol.J92, no.4, pp.256-261, April 2009
- [44] 片山友幸, “GPS リピータシステムによる地下街測位と経路案内の実験,” 電子情報通信学会誌, vol.J92, no.4, pp.276-280, April 2009
- [45] Kenji Inomata, Takashi Hirai, Yoshio Yamaguchi, Hiroyoshi Yamada, “Two-dimensional target location estimation technique using leaky coaxial cables,” IEICE Trans., Commun., vol.E91-B, no.3, pp.878-886, March 2008.
- [46] 猪又憲治, 平位隆史, “漏洩同軸ケーブルによる広域周辺監視センサーの測距方式の検討,” 信学技報, 宇宙・航行エレクトロニクス, vol.105, no.618, pp.29-34, February 2006.
- [47] 猪又憲治, 平位隆史, 鷺見和彦, 田中健一, 山田寛喜, 山口芳雄, “漏洩同軸ケーブルによる 2 次元測位技術の基礎検討,” 信学技報, 宇宙・航行エレクトロニクス, vol.106, no.329, pp.13-18, October 2006.

- [48] 猪又憲治, 平位隆史, 山口芳雄, 山田寛喜, “漏洩ケーブルの放射モードと物体センシング特性,” 信学技報, 宇宙・航行エレクトロニクス, vol.107, no.202, pp.1-5, August 2007.
- [49] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “A new position detection method using leaky coaxial cable,” IEICE Electronics Express, vol.5 no.8 pp 285-290, April 2008.
- [50] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “漏えい同軸ケーブルを用いたTDOAによる端末位置検出方式,” 信学論 (B), vol.J92-B, no.1, pp320-327, 2009年1月.
- [51] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “A new position detection method using Leaky Coaxial Cable,” Proc. of 2008 URSI General Assembly (2008 URSI GA), CP1p5, Chicago, United States, August 2008.
- [52] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Area evaluation of TDOA based position detection method by using two leaky coaxial cables,” Proc. of The 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '09), S41-3, Sendai, September 2009.
- [53] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Two dimensional position detection method using bi-directional leaky coaxial cable based on TDOA,” Proc. of The 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2009 (PIMRC'09), P6-26, Tokyo, September 2009.
- [54] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Position detection method using leaky coaxial cable based on TOA and RSSI,” Proc. of The 2009 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK2009), Osaka, Japan, May 2009.
- [55] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “漏えい同軸ケーブルを用いた端末位

- 置検出システムの位置検出誤差の評価,” 信学技報, マイクロ波, vol.107, no.173, pp.97-102, 2007年8月.
- [56] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “漏えい同軸ケーブルを用いた無線端末の端末位置検出,” 信学総大, B-5-151, 2007年3月.
- [57] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “漏えい同軸ケーブルを用いた TOA と RSSI による位置検出方式についての評価,” 信学ソ大, B-5-126, 2009年9月.
- [58] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “漏えい同軸ケーブルを用いた位置検出方法に関して送信パルス幅がもたらす影響についての研究,” 平成 21 年電気関係学会関西支部連合大会, G187, 2009年11月.
- [59] 携帯端末を利用したパノラマ画像ナビゲーションシステム構築に関する調査研究会, “携帯端末を利用したパノラマ画像ナビゲーションシステム構築に関する調査研究報告” 総務省近畿総合通信局, 2003年3月
- [60] 地下街ナビゲーションシステムに関する調査研究会, “地下街ナビゲーションシステムに関する調査研究報告” 総務省近畿総合通信局, 2004年3月
- [61] 日本電気株式会社, 屋内位置管理ソリューション (SmartLocator), <http://www.nec.co.jp/rfid/solution/smartlocator/index.html> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [62] Mitsunori Morisaki, Ken-ichi Ishii, Jun-ichi Matsuda, Akihisa Kurashima and Shuntaro Yamazaki, “A Proposal of Hybrid Positioning System with Illumination Tags and Wireless LAN,” WPMC, MA12-3 pp.V1_339-V1_343, September 2004.
- [63] 橋本尚久, 一色直樹, 井口正雄, 森崎充敬, 石井健一, “SmartLocator と RFID の連携による物品位置管理ソリューション,” NEC 技報 vol.59 no.2, April 2006.
- [64] 消防法
<http://law.e-gov.go.jp/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [65] 消防法第十七条
<http://law.e-gov.go.jp/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)

- [66] 消防法施行例第二十九条の三
<http://law.e-gov.go.jp/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [67] 岸本利彦, 佐々木伸, LCX 通信システム, 電気通信学会, 1982.
- [68] Shozo Komaki, Katsutoshi Tsukamoto, Tomoaki Ishida, Nobuyuki Fujii, Takeshi Higashino, Akihiko Murakoshi, “Wireless over IP Experiments in Osaka University,” Proceedings of APMC 2004
- [69] 安部哲也, 西村佳久, “新幹線デジタル列車無線における LCX 布設環境と伝送品質,” 信学総大, pp.598, March 2001.
- [70] 原田芳昭, 吉田勝弘, “新幹線列車無線用デジタル無線装置の開発,” 信学総大, pp.597, March 2001.
- [71] 高野一彦, 石井伸直, 鈴木文生, 小川幸三, 御園信行, “ギガヘルツ対応広帯域漏洩同軸ケーブル (WBLCXTM),” フジクラ技報, no.110, pp.9-15, April 2006.
- [72] 株式会社フジクラ メタルケーブル事業部, “超細径漏洩同軸ケーブル (5D-LCX) の開発,” Fujikura NEWS, no.336, July 2009.
- [73] Jun Hong Wang, Kenneth K. Mei, “Theory and Analysis of leaky coaxial cables with periodic slots,” IEEE Trans., ANTENNAS AND PROPAGATION, vol.49, no.12, December 2001. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 49, NO. 12, DECEMBER 2001
- [74] 三菱電機株式会社, 広域侵入検知センサー MELWATCH,
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/security/area/melwatch/> . (最終アクセス: 2010年1月12日)
- [75] 電気通信学会 (編), “アンテナ工学ハンドブック (第2版),” 第3章~第4章, オーム社, 1980.
- [76] IEEE, IEEE Std 802.11n-2009:Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009.

- [77] IEEE, IEEE Std 802.16e-2005:Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems - Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, 2006
- [78] 3GPP TR25.913, Requirement for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), 2006.
- [79] 3GPP TR25.912, Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) (Release 7), 2007.
- [80] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [81] 橋本修, 阿部琢美, FDTD 時間領域差分法入門, 森北出版, 1996.
- [82] 橋本修, 実践 FDTD 時間領域差分法, 森北出版, 2006.

本論文に関する原著論文

A 学会論文

1. Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "A new position detection method using leaky coaxial cable," IEICE Electronics Express, vol.5 no.8 pp 285-290, April. 2008.
2. 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, "漏えい同軸ケーブルを用いた TDOA による端末位置検出方式," 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.J92-B, no.1, pp320-327, 2009 年 1 月.

B 国際会議発表 (査読有)

1. Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "A new position detection method using Leaky Coaxial Cable," Proc. of 2008 URSI General Assembly (2008 URSI GA), CP1p5, Chicago, United States, August. 2008.
2. Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "Area evaluation of TDOA based position detection method by using two leaky coaxial cables," Proc. of The 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 09), S41-3, Sendai, September. 2009.
3. Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "Two dimensional position detection method using bi-directional leaky coaxial cable based on TDOA," Proc. of The 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2009 (PIMRC'09), P6-26, Tokyo, September. 2009.

C 国際会議発表 (査読無)

1. Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "Position detection method using leaky coaxial cable based on TOA

and RSSI,” Proc. of The 2009 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK2009), Osaka, Japan, May. 2009.

D 国内大会発表

1. 西川健一，東野武史，塚本勝俊，小牧省三，“漏えい同軸ケーブルを用いた無線端末の端末位置検出，” 電子情報通信学会 2007 年総合大会，B-5-151，2007 年 3 月.
2. 西川健一，東野武史，塚本勝俊，小牧省三，“漏えい同軸ケーブルを用いた TOA と RSSI による位置検出方式についての評価，” 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会，B-5-126，2009 年 9 月.
3. 西川健一，東野武史，塚本勝俊，小牧省三，“漏えい同軸ケーブルを用いた位置検出方法に関して送信パルス幅がもたらす影響についての研究，” 平成 21 年電気関係学会関西支部連合大会，G187，2009 年 11 月.

E 国内研究会発表

1. 西川健一，東野武史，塚本勝俊，小牧省三，“漏えい同軸ケーブルを用いた端末位置検出システムの位置検出誤差の評価，” 電子情報通信学会技術報告，vol.107，no.173，pp.97-102，2007 年 8 月.