

Title	Radio on Free Space Opticsにおける凸面鏡利用によ る遮へい回避と空間多重方式の提案			
Author(s)	東野, 武史; 塚本, 勝俊; 小牧, 省三 他			
Citation	電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス. 2008, J91-C(1), p. 50-60			
Version Type	VoR			
URL	https://hdl.handle.net/11094/3081			
rights	copyright©2008 IEICE			
Note				

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Radio on Free Space Optics における凸面鏡利用による遮へい回避と

空間多重方式の提案

X.

論

 東野
 武史[†]
 塚本
 勝俊[†]
 小牧
 省三[†]
 稲垣
 惠三^{††}

 熊本
 和夫^{†††}
 安川
 交二^{†††}

Proposal of Shadowing Reduction and Space Division Multiplexing in Radio on Free Space Optics Using Convex Mirrors

Takeshi HIGASHINO[†], Katsutoshi TSUKAMOTO[†], Shozo KOMAKI[†], Keizo INAGAKI^{††}, Kazuo KUMAMOTO^{†††}, and Koji YASUKAWA^{†††}

あらまし 干渉波抑圧や信号多重をはじめとした無線信号処理技術の発展により無線通信の高効率化が進む一 方,電波の高分配性による他システムへの電波干渉は依然課題となっている.また,光無線通信における光波の 高い直進伝搬特性は遮へいに対して弱く,これによって生じるリンク瞬断の低減が課題である.本論文では,光 搬送波の強度に無線信号をアナログ形式のまま重畳して広帯域伝送を行う Radio on Free Space Optics の下り リンクにおいて,同じ信号で変調された光波を凸面鏡を用いて受動的に拡散し,遮へいによるリンク瞬断を回避 しつつ室内に形成する無線サービスエリア内での空間多重を可能とするシステムを提案している.提案方式がも たらす受信光電力の分散効果,遮へいの回避効果,実効伝送速度の改善効果,並びに空間多重の適用によるマク ロダイバーシチ効果を計算機シミュレーションにより評価する.

キーワード RoFSO, 無線通信, 遮へい回避, 凸面鏡, 空間分割多重

1. まえがき

無線通信通信システムの著しい発展により「いつで も どこでも 誰とでも」通信が可能なユビキタス通 信環境が実現しつつある.これらの発展を支えた無 線技術として無線のマルチパス干渉による周波数選 択性フェージング環境下においても高速伝送を可能と する直交周波数分割多重(OFDM:Orthogonal frequency division multiplexing)方式や符号分割多重 (CDM:Code division multiplexing)方式や空間分割 多重(SDM:Space division multiplexing)方式を利 用した無線LAN(wireless local area network)[1],[2] は,広帯域なインターネットアクセスを行うためのシ

^{†††} 大阪工業大学 , 大阪市

ステムとして公共スペースに浸透してきている.

ところが室内利用を主とする無線 LAN では,隣接 する部屋にアクセスポイントを設置すると,隣接する 部屋間で無線チャネルが競合するなどの問題が発生す ることがある.アクセスポイントの乱立は被干渉シス テム並びに被干渉端末を増加させ,実効伝送速度の劣 化や周波数利用効率の劣化を招いてしまうことになる.

一方,光波を搬送波とする光無線通信は,光ファイ バ通信技術を空間伝送に拡張させた技術であり,ファ イバ通信との技術的な親和性が高いため,1Gbit/sを 超える広帯域なリンクを光ファイバを敷設することな く容易に構築可能とする特徴を有し,更に物理的にセ キュアな通信が可能であるため短距離の端末間通信で の利用を主とする[3]~[7].

この光無線通信方式の中に,無線システムの電波を アナログ形式のまま光搬送波の強度に電波の形式を 閉じ込めて伝送する RoFSO (Radio on Free Space Optics)方式がある[8].この方式は,光ファイバ無線 (Radio on Fiber: RoF)を空間伝送技術に拡張した技

[†] 大阪大学大学院工学研究科,吹田市

Osaka University, Suita-shi, 565–0871 Japan

^{††} ATR , 京都府

Advanced Telecommunication Research, Kyoto-fu, 619–0237 Japan

Osaka Institute of Technology, Osaka-shi, 535–8585 Japan

術であり,光通信方式と無線通信方式を融合させるこ とにより無線通信で発展した干渉波抑圧,信号多重に 代表される優れた信号処理技術を光無線通信環境にそ のまま適用可能とすることを最大の特徴とする.更に, 光の直進性と低分配性を積極的に利用することで隣接 する部屋間の電波干渉を抑圧しつつ,高速な無線シス テムが利用可能となる[9].しかし,上記に述べた光無 線通信方式並びに RoFSO では光波の直進伝搬特性に より比較的障害物の多い室内利用においてはリンク瞬 断による影響が大きいことが予想される.遮へいによ るリンク瞬断の対策は,ディジタル信号を伝送する光 無線方式と RoFSO 方式共通の課題である[10],[11].

そこで本論文では,他の無線システム,無線端末へ の与干渉を最大限に抑えながらパッシブな遮へい対策 を可能にするために従来の狭ビームを用いて空間伝送 を行う RoFSO 方式に凸面鏡反射による非再生中継方 式を導入することを提案する.同じ信号で変調された 光波を室内の天井に分散配置された凸面鏡で反射させ ることで,部屋全体に均一に光信号を分配し,光波の 伝搬するパスを複数生じさせることで遮へい回避を実 現することをねらいとする.

本論文では更に,下りリンクにおいて光搬送波の強 度に重畳した無線信号に無線チャネルの逆特性を重 み付けることで,無線信号の空間多重方式を提案す る[12],[13].これは,複数の光波伝搬路から受信され る RF 信号の間に発生するマルチパス干渉を,無線信 号処理により補償することで空間多重も同時に実現す ることをねらいとする.

本論文は,以下のように構成される.2.では,提案 システムの構成を述べ,下りリンクにおける遮へい回 避と空間多重のための信号処理方式について述べる. 3.では,光リンクを通過した無線波の受信 CN 比を解 析によって求める.4.では,シミュレーションに用い た遮へい物モデル,遮へい物の動き,凸面鏡の配置に ついて述べる.5.~8.では,下りリンクについて,そ の遮へい回避効果と実効伝送速度に関するシミュレー ション結果を示し,9.でまとめを述べる

2. 提案システム構成

2.1 凸面鏡を用いた非再生中継方式

図1に, RoFSO システムにおいて遮へい回避を目 的としたシステムの構成を示す.図1のように,この システムは,サービスエリアに複数の散在した凸面鏡 と一つの無線基地局(BS: Base Station)によって構



図 1 遮へい回避を目的とした提案システム構成 Fig.1 Configuration of proposed system for shadowing reduction.

成される.BS において,RF 信号で凸面鏡ごとに用意 された LD (Laser Diode)を強度変調し,光信号を発 生させる.そして,それらの光信号を各凸面鏡に向け て狭ビームで RoFSO リンクを通して送信する.各凸 面鏡では BS から送信された光信号をサービスエリア 全体に向けて反射・拡散する.サービスエリア内の無 線端末は BS から送信された光信号を,複数の凸面鏡 を通して受信し,O/E 変換して RF 信号を得る.この とき,最低一つでも見通しが確保されていれば通信が 可能である.

このシステムは,

 分散点における凸面鏡を仮想 BS とし,電源が 不要である.

• 散在する凸面鏡と BS の間は狭ビームの RoFSO リンクで結ばれ,配線が不要である.

 RoFSO 方式を用い, RF 信号を光に閉じ込め て送信することで, OFDM などの RF 信号に組み入 れられているマルチパス対策技術をそのまま活用する ことが可能である.

光ビーム一つ当りの光電力を抑えることができるため,アイセーフ性が高い.

といった利点を有する.

2.2 空間多重システム構成

図 2 に,空間多重を目的としたシステムの構成を示 す.図 2 は,図 1 に RF 信号に発生するマルチパス 干渉を打ち消すための重み付け信号処理を付加したシ



図 2 空間多重を目的とした提案システム構成 Fig. 2 Configuration of proposed system for space division multiplexing.

ステムである.BSにおいて,サービスエリアに存在 する各無線端末に送信する RF 信号を発生させ,重み 付け信号処理した後、それらで凸面鏡ごとに用意され た LD を強度変調する.そして得られた光信号を BS からサービスエリア内に散在した各凸面鏡に向けて送 信し,各凸面鏡によって反射,拡散された光信号を無 線端末が受信する.ここで信号処理部では,上りリン クの受信信号から推定される RF の伝搬路行列 H の 逆行列 H^{-1} で RF 信号の重み付けを行う. H は, 複 素振幅応答と遅延応答の複素数の要素をもつ、時分割 復信(TDD: Time Division Duplex)方式を仮定し, 上りリンク信号をもとに伝搬路パラメータを推定し, 推定した伝搬路パラメータから,無線端末の受信位置 において信号電力対干渉電力比(SI比)が最大となる ような重み付けを行う.ここで, RF 信号として, 同 一周波数チャネルを利用する無線端末がサービスエリ アに複数存在するとする.光源の数を N 個,無線端末 の数を M 個 ($M \leq N$)とすると, M 個の無線端末 での受信信号 $r = [r_1, r_2, ... r_M]^{\mathrm{T}}$ は, 各無線端末への 重み付け前の送信信号を $s = [s_1, s_2, ... s_N]^{\mathrm{T}}$,重み付 け後の送信信号を, $s' = [s'_1, s'_2, ...s'_N]^{\mathrm{T}}$,各無線端末 で発生する雑音を, $z = [z_1, z_2, ... z_N]^T$,とすると,

$$r = CHs' + z = CHH^{-1}s + z$$
(1)
= CIs + z

となる.ここで,IはM imes Mの単位行列,Cは正の

実数であり,アイセーフティを考慮して大きな送信光 電力が放射されないように制限をかけるものである. 式(1)から分かるように,各無線端末では干渉波が抑 圧され,希望信号のみを受信できる.また,伝搬路行 列 H は,

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{21} & \cdots & H_{N1} \\ H_{12} & H_{22} & \cdots & H_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1M} & H_{1M} & \cdots & H_{NM} \end{bmatrix}$$
(2)

で与えられ, *H_{nm}* は *n* 番目の凸面鏡に向けて送信された信号が拡散反射され, *m* 番目の受信端末で受信したときの RF の複素包絡線変動を示す.

ところで,本論文で提案するシステムの下りリンク では遮へい回避効果や実効伝送速度の改善のため,送 信機の重み付け処理を行うが,これには上りリンクの 受信信号から推定した RF の伝搬行列 H を必要とす る.本論文では,3.以降の解析並びにシミュレーショ ンでは理想的な上りリンクを仮定し, 伝搬路パラメー タ推定が完全に行われると仮定している.ここで,上 リリンクのシステム構成並びにその通信品質から受け る影響について考察を加えておく、上りリンクについ ても下りリンクと同じ凸面鏡を用いて構成することが 必要になるが,これには端末側にすべての凸面鏡へ向 いた光ビームが必要になる.これには,端末の設置容 易性も考慮して端末側から全方向をカバーできる狭指 向ビームのマルチ光源を用意することで実現が可能で ある、このような端末であれば上りリンクと下りリン クの遮へい回避効果はほぼ同じ特性が得られるものと 期待される.ただし,上りリンクの CN 比などのリン ク品質は伝搬路パラメータの推定値に影響を与えるの で,検討を必要とする.一方,アイセーフティの制限 から端末が狭指向性ビームを用いることができない場 合,上りリンクには拡散光を用いる必要が生じる.こ の場合も,上りリンクの通信品質が下りリンクと異な るため,上りリンクの特性評価を別途行う必要がある. 以上のように、上りリンク特性はマルチパス干渉を打 ち消すための重み付け信号処理に影響を与えるが,本 論文では理想的な上りリンクを仮定して,下りリンク の特性評価に焦点を絞っているので今後の検討課題と したい.

3. 受信 CN 比解析

3.1 光源モデル

光信号を空間へ送信する光源の指向性は指向性関数 で表すことができる.指向性関数 $I(\theta, \varphi)$ は,光源を原 点とした球座標 (r, θ, φ) において,送信光電力1[W] の光源から (θ, φ) 方向に放射される単位立体角当りの 放射光電力分布を表す.本論文では,光源モデルは光 無線システムでよく用いられる一般化 Lambertian モ デルと仮定する [14], [15], [18].一般化 Lambertian モ デルの指向性関数は, φ について等方であり,発光面 の法線方向からの角度を θ とすると,

$$I(\theta) = \frac{l+1}{2\pi} \cos^l \theta \tag{3}$$

と表すことができる [14] . ここで, l はビームの広が りを表す Lambertian 次数であり, 送信ビーム半値角 α_h と,

$$\alpha_h = \cos^{-1}(0.5)^{\frac{1}{l}} \tag{4}$$

の関係をもつ.式 (4) より送信ビーム半値角 $\alpha_h = 60$ [deg] のとき l = 1, $\alpha_h = 45$ [deg] のとき l = 2, $\alpha_h = 10$ [deg] のとき l = 45 となる.

また,光無線通信に用いる光が人の目や皮膚に照射 されたとき,その光が強すぎると,目や皮膚に障害を 与えるおそれがあるため,光無線通信システムの安全 性について規格化がなされている[16],[17].そして, 光無線通信システムに用いる光源の波長,露光時間な どによって,レーザの放射レベルが安全か否かを判断 する基準として,最大許容露光量(MPE:Maximum Permissible Exposure)が規定されている.本論文で は,光源から10cmの位置に保護媒体を設置すること で,それ以上光源に接近できないものとし,光源から 10cm 離れた場所での露光強度がMPE 値以下になる 状況での解析を行う.

3.2 光無線信号の伝搬路特性

図 3 に示す無指向直射方式の伝搬路モデルにおいて,室内光無線通信システムの伝搬路光強度 DC ゲイン S(0) は, 3.1 の光源モデルを用いると,

$$S(0) = \begin{cases} (l+1)A2\pi d^2 \cos^l(\theta')T_s(\psi)g(\psi)\cos(\psi) \\ (0 \le \psi \le \Psi_c) \\ 0 \\ (\psi > \Psi_c) \end{cases}$$
(5)



図 3 無指向直射方式における伝搬路モデル Fig. 3 Optical propagation model of diffuse directed method.

で与えられる [15], [18].ここで, A は受光部検波面面 積, d は送受信機間の距離, θ' は光源のビーム中心方 向と受信機送信機を結ぶ線とのなす角, ψ は受信機へ の入射角, $T_s(\psi)$ は受信機側の背景光を抑圧する波長 フィルタの信号光透過率, Ψ_c は受信機の視野角であ る.また, $g(\psi)$ は集光器による集光利得である.本論 文では集光器として,

$$g(\psi) = \begin{cases} \rho^2 \sin^2 \Psi_c & (0 \le \psi \le \Psi_c) \\ 0 & (0 > \Psi_c) \end{cases}$$
(6)

で与えられる Idealized Nonimaging Concentrator [19] を用いるものとする.ここで, ρ は集光器のレン ズの屈折率である.

室内光無線通信システムの形態として無指向直射方 式を用いるが,無指向方式であっても,図3に示すよ うに受信機が壁面から離れた位置にある場合,壁面反 射光成分が少なく直射光成分が受信信号光のほとんど を占めるため,壁面反射光にに起因して発生するRF 信号に対してのマルチパスの影響は無視できるほど小 さい.このため,光波伝搬路による光信号の伝搬特性 はRFの周波数 f,によらず一定であり,

$$S(f) = S(0) = S_0 \tag{7}$$

と表すことができる[15].

さて,ここで複数の光波伝搬路の間で発生する光の 波長レベルのフェージングの影響を検討する.提案方 式のように光源から複数の経路を通過して光信号が単 一の検波面で受信されたとき,光のマルチパスによっ て光検波面内の位置に依存する強度変動が発生する. そして,光ファイバに比べて大きな検波面積をもつ光 無線の検波面上には数千オーダの強度変動が現れることになる.しかし,光検波器の出力電流は検波面上の 強度の面積分に比例するためこの影響は現れない.更 に,この検波面による平滑効果は独立の光源や別波長 の光源を用いることにより強調されることになる[15].

3.3 凸面鏡による光信号の反射と拡散

BS から狭ビームの光信号を散在する凸面鏡に向け て送信し,各凸面鏡が反射,拡散するモデルとして, BS からのビーム広がり角は十分小さく, 球面収差が 無視できる理想的な球面鏡 [20] を用いると仮定する. 凸面鏡は鏡の表面が凸型球面になっているもので,普 通の鏡より広い視野が得られるので,道路のカーブミ ラーや車のフェンダーミラー,ルームミラーなど,広 い視野を得たいときに使用されている.凸面鏡で光の 反射の様子を図4に示す.図4からも分かるように, 凸面鏡では球面の曲率 Rの半分が焦点となり,鏡の内 部に焦点ができる.この焦点は実際にある焦点ではな く, 焦点があるように光が拡散するので虚焦点と呼ば れる.そして,凸面鏡に入る平行光束は虚焦点から拡 散するように反射する.また,凸面鏡が作る物体像は いつも虚像であり, 虚像のできる位置は物体が遠くに あるときは虚焦点の近くにでき,凸面鏡に近くなるに 従って鏡の近くにできる.このとき,

 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$ (8)

で表される.ここで, a は物体から鏡までの距離, b は鏡から像までの距離, F は鏡の焦点距離, R は鏡 の曲率半径であり, a, b, F の符号は, 鏡の前方にあ るときは正, 鏡の後方にあるときは負である.本解析 では, 鏡から距離 a の位置にある BS から狭ビーム の光信号を散在する凸面鏡に向けて送信する.このと き, サービスエリア上の無線端末は, 凸面鏡が反射, 拡散した光信号を, 鏡から距離 b の位置にある仮想



Fig. 4 Optical reflection by convex mirror.

的な光源から受信する状態になる.このとき,仮想光 源と無線端末を結ぶ線の,反射面との境界面の極小領 域dSに入射する光電力密度を P_c ,仮想光源とdSと の距離をR',仮想光源と無線端末との距離をd'とす ると,R' << d'のとき無線端末での光電力密度は, $P_c(R'^2/d'^2)$ となる.ただし,鏡面での信号光の反射 率は1とする.

3.4 受信 RF 搬送波電力対雑音電力比

受信機で発生する雑音要因として,信号光による ショット雑音,背景光によるショット雑音,そして熱 雑音を考慮する.なお,受信信号光電力が小さいため 光源の強度雑音(RIN)については無視することにす る.そして,これらの雑音の確率密度関数がガウス分 布に従うものと近似する[21].受信機で発生する雑音 電力 σ_{total}^2 は,

$$\sigma_{\rm total}^2 = \sigma_{\rm shot}^2 + \sigma_{\rm thermal}^2 \tag{9}$$

と表すことができる.

まず,ショット雑音は信号光と背景光によるものが 考えられ,受信信号光電力を P_r ,受光部に入射する背 景光電力を P_b とすると,ショット雑音電力 σ_{shot}^2 は,

$$\sigma_{\rm shot}^2 = 2q\eta(P_b + P_r)B \tag{10}$$

で与えられる [22].ここで, *q* は電気素量, *η* は PD (Photo Diode)の量子効率, *B* は信号帯域幅である.

そして,電気回路で発生する熱雑音電力 $\sigma^2_{
m thermal}$ は,

$$\sigma_{\rm thermal}^2 = \frac{4kTB}{R_F} \tag{11}$$

で与えられる [22].ここで, k はボルツマン定数, T は等価雑音温度, R_F は負荷抵抗である.

上述の光源モデルから伝搬路を通過したときの受信機における受信光電力 P_r は,送信光電力を P_t とすると,

$$P_r = S_0 P_t \tag{12}$$

で表される.

本解析では光変調方式として,光強度変調/直接 検波方式 (Intensity Modulation/Direct Detection: IM/DD)方式を用いる.このとき,光強度変調信号 $P_L(t)$ は,正負両極性の成分をもつRF信号をs(t)と すると,バイアス電流をRF信号に付加し,

$$P_L(t) = P_t(1 + \beta s(t)) \tag{13}$$

となる.ここで, β は変調度である.ただし,s(t) は 正規化された信号であり, $|s(t)| \leq 1$ である.この光 強度変調信号の DC 成分は,付加したバイアス電流に よるもので情報が含まれておらず,受信時に除去する ため,受信した光信号を電気信号に変換した受信 RF 信号 $s_r(t)$ は,

$$s_r(t) = \eta P_t S_0 \beta s(t) \tag{14}$$

となる.このとき,受信 RF 信号の電力は,

$$< s_r^2(t) > = < (\eta P_t S_0 \beta s(t))^2 >$$

= $(\eta P_t S_0 \beta)^2 < s^2(t) >$ (15)

となる.ここで, < · > は, 平均をとることを示す. よって, 受信無線搬送波電力対雑音電力比(CNR)は,

$$\operatorname{CNR} = \frac{\langle s_r^2(t) \rangle}{\sigma_{\text{total}}^2} = \frac{(\eta P_t S_0 \beta)^2 \langle s^2(t) \rangle}{\sigma_{\text{total}}^2}$$
(16)

となる.

4. シミュレーション

4.1 凸面鏡配置モデル

計算機シミュレーションで用いたサービスエリアは, 図 5 のように,縦横 5 m,高さ 3 m の空間を仮定し, 天井面の中心に BS を 1 箇所, 天井面の四隅にサービ スエリア全体を見通せるように分散点となる凸面鏡を 配置した.図5では,提案方式の分散点4の場合の分 散点配置モデルを示しているが, BS から直接, 光信 号を拡散させてサービスエリアに送信する従来方式, 及び提案方式において分散点が4以外の場合の,分 散点の配置は図 6 に示すように配置した . BS から直 接,光信号を拡散させてサービスエリアに送信する従 来方式の解析モデルでは,図6の従来方式に示すよう に, サービスエリアの中心に BS が配置されている. BS から放射される光ビームの中心方向は鉛直下向き である、凸面鏡反射後の光ビームの中心方向は、サー ビスエリア全体に光信号を届けるため,上下角は下か ら 45°で, サービスエリアの中心方向を向いている.

4.2 遮へい物モデル

遮へいの要因となる遮へい物として,サービスエリ ア内を人が一様ランダムに歩行している状況を仮定し, 人の影が光無線リンクを遮断するものとする.図7に 示すように歩行している人間を,高さ160 cm,横幅 40 cm,縦幅20 cmの直方体としてモデル化した.無





Fig. 6 Alignment of convex mirror.

線端末はサービスエリア上にランダムに存在するもの とする.無線端末が存在する位置は,無線端末を手元 で使用する状況(高さ1m)と,通話時に耳元で使用 する状況(高さ1.5m)を仮定した.遮へいの原因は, サービスエリア上の遮へい物の影によって送受信機 間の光波伝搬路が遮断されることによる.シミュレー ションでは,端末使用者の影による遮へいも考慮して いる.なお,移動速度は4km毎時で,移動方向はラ



図 7 人のモデルと端末の高さ

Fig. 7 Human model as an obstacle and height of terminal.

表 1	シ	ミュレーショ	ンパラメータ
Table	1	Simulation	parameters.

送信光電力(合計値)	$100 [\mathrm{mW}]$	
光源モデル	一般化 Lambertian モデル	
光源波長	1550 [nm]	
光源半値角(狭ビーム)	$3.0 [\mathrm{deg}]$	
光源半値角(従来方式)	$40.0 [\mathrm{deg}]$	
凸面鏡曲率半径	$26.8 [\mathrm{cm}]$	
受信機	angle-diversity receiver	
集光器	Idealized Nonimaging	
	Concentrator	
集光器レンズ屈折率	1.5	
受光部検波面面積	$0.1 [{\rm cm}^2]$	
光波長フィルタ透過率	1.0	
背景光電力	$0.001 [{\rm mW/cm^2}]$	
PD 量子効率	$0.8 [\mathrm{A/W}]$	
受信機雑音温度	300 [K]	
負荷抵抗	$50.0 [\Omega]$	

ンダムに決定する.遮へい物は,サービスエリア外ま で移動すると消滅し,この直後サービスエリア内の任 意の位置に遮へい物を発生させる.このとき,遮へい 物の発生する位置はランダムに決定する.

4.3 シミュレーションパラメータ

計算機シミュレーションに用いたシミュレーション パラメータを表1に示す.提案方式において,BSか ら散在する凸面鏡に向けて送信される光信号の送信 ビーム半値角を3.0°,従来方式において,BSから直接 サービスエリアに向けて送信される光信号の送信ビー ム半値角を40.0°とし,送信光電力は,分散点4の場 合は25 [mW]×4,従来方式の場合は100 [mW]×1の ように,それぞれの凸面鏡位置モデルにおいて,合 計が100 [mW] となるようにした.また,光源波長は 1550 [nm] とする.受信機は広い視野と集光利得を確 保するため,angle-diversity receiver [15] を用いた.

表 2 RF 信号諸元 Table 2 Parameters of RF signal.

使用周波数帯	2.4 GHz 帯
帯域幅	$16.6 \left[\mathrm{MHz} \right]$
1 次変調方式	BPSK, QPSK,
	16-QAM, 64-QAM
2 次変調方式	OFDM
FFT ウィンドウサイズ	64
サブキャリヤ数	48
シンボル長	$4.0 [\mu s]$
ガード区間長	$0.8 [\mu s]$
誤り訂正	畳込み符号(拘束長7,
	符号化率 1/2, 2/3, 3/4)

表 3 RF 信号伝送モード Table 3 Transmission mode of RF signal.

伝送	変調	符号	最大伝送	所要 CN
モード	方式	化率	速度 [Mbps]	比 [dB]
Mode 1	BPSK	1/2	6	1.5
Mode 2	BPSK	3/4	9	4.5
Mode 3	QPSK	1/2	12	5
Mode 4	QPSK	3/4	18	8
Mode 5	16-QAM	1/2	24	10
Mode 6	16-QAM	3/4	36	14
Mode 7	64-QAM	2/3	48	18
Mode 8	64-QAM	3/4	54	20

したがって,式(6)の Ψ_c は,シミュレーション結果 には影響を与えない.ショット雑音の要因となる背景 光電力は,室内での使用を仮定して $0.001 \, [mW/cm^2]$ とした.表2にRoFSOで光搬送波に閉じ込めるRF 信号の諸元を示す.このRF信号は $2.4 \, GHz$ 帯におけ る無線LANの規格,IEEE802.11g [23] 準拠の信号 であり,表3に示す変調方式と符号化率から構成され る八つの伝送モードをもつ.

5. 受信光強度の分散効果

提案方式の受信光電力の分散効果を示す.図8と 図9に,床面から1mの高さに無線端末が存在する 場合のサービスエリア上での光強度分布を,従来方式 と提案方式において分散点をサービスエリアの四隅 に配置した場合(分散点4)について示す.図8より 従来方式では,BSの直下にあるサービスエリア中心 付近では約-30dBm/cm²の光強度があるのに対し, サービスエリアの隅部では光強度が-45dBm/cm²以 下になることが分かる.これは,光信号の減衰と指向 性によるものである.一方,図9より,提案方式を 用いて送信点を分散することで,同じ出力電力の光







- 図 9 提案方式(分散点 4)の場合の光強度分布(端末高 さ 1 m)
- Fig. 9 Optical intensity distribution of proposed method (4 points, height of terminal = 1 m)

源を用いながらも,サービスエリア全体で光強度を -40 dBm/cm² 以上にできることが分かる.

6. 遮へい回避効果と実効伝送速度の改善 効果

サービスエリア内を人が歩行することによって生じ る遮へいの影響のシミュレーション結果を示す.図10 に無線端末が床面から高さ1mの位置に存在する場合 の,サービスエリア内に存在する人の人数と,その人 の影によって送受信機間のすべての光波伝搬路が遮断 され,通信ができなくなる確率(Outage rate)を示 す.また,端末使用者自身の方向からの光波伝搬路は すべて遮断した.図10より,提案方式によって分散 点を増やすことで遮へいの影響を軽減でき,サービス エリア内に人が10人存在するとき,その影によって 通信が遮断される確率は,従来方式が約9.3%である



のに対し,分散点4の提案方式では約0.2%まで軽減 できていることが分かる.

図 11 に遮へい要因となるサービスエリア内に存在 する人の人数と,そのときの無線端末の平均伝送速度 を示す.ここでの平均は端末の配置場所による集合平 均である.複数の光波伝搬路から受信される RF 信号 の間に発生するマルチパス干渉の影響は無視し,受信 光電力の加算値から得られる無線信号電力を計算し, IEEE802.11gに基づく伝送モードの最大伝送速度と パケット誤り率 (PER) から算出した. 伝送モードは ビット誤り率 (BER) が 10⁻⁶ 以下となるように選択 し,パケットサイズは1539 バイトとした.本結果は, マルチパスの影響が完全にない場合に達成可能な伝送 速度の上限値を表す.図 10 と図 11 より,従来方式 では,最低でも約25%の通信遮断があるのに対し,分 散点4の提案方式では,光波伝搬路の遮へい要因とな る遮へい物が10人存在した場合でも約0.4%まで遮断 確率を軽減できることが分かる.

図 12 と図 13 にサービスエリア内に存在する人の人





Fig. 13 Relationship between the number of obstacles and average throughput (height of terminal =1.5 m).

数と,その人の影によって送受信機間のすべての光波 伝搬路が遮断され,通信ができなくなる確率(Outage rate)とそのときの無線端末の平均伝送速度を示す. 端末使用者は,端末を高さ1.5mで頭部から4cm離 したところで使用しているとする.図12と図13よ り,端末高1.5mの状況では,無線端末使用者以外の 人の影に起因する遮へいよりも,使用者自身による遮 へいが通信品質に対する影響が大きく,従来方式では, 無線端末使用者自身の影により約48%の通信遮断があ るのに対し,分散点4の提案方式では,無線端末使用 者以外に遮へいの要因となる人が10人存在した場合 でも約1.4%に遮断確率を軽減できることが分かる.

マクロダイバーシチ効果によるエリア 拡大効果

図 14 に遮へい回避を目的とする構成(図 1), す なわち BS で重み付け信号処理を行わないシステム (w/o singnal processing)と,空間多重を目的とする 構成(図 2), すなわち BS で重み付け信号処理を行



power and area coverage.

うシステム (w/ signal processing) の光送信電力に 対するエリアカバー率を示す.ここで凸面鏡の配置モ デルは分散点4のモデルを用い,無線端末は床面から 高さ1mの高さにランダムな場所に配置させた.無線 LAN の最高速伝送速度を達成するのに必要とされる CN比20dBを所要無線信号品質の基準とした.図14 における送信光電力は4点の合計値である.また,両 構成ともに端末側でチャネル推定,マルチパス補償は 行わないものと仮定する.遮へい回避を目的とする構 成 (w/o signal processing) では RF 信号間のマルチ パス干渉の影響によりサービスエリア全域をカバーす るために大きな送信光電力を必要とするのに対し,空 間多重を目的とする構成 (w/ signal proceesing) で は, すべてのパスを有効に利用し, 低い光電力でエリ ア全体をカバーでき,サービスエリアの 99%をカバー するために必要な送信光電力は,信号処理を加えない 場合に比べ5dB低くてよいことが分かる.

8. 空間多重の適用による実効伝送速度の 改善効果

図 15 に分散点 4 の凸面鏡配置,同一チャネルの RF 信号を利用する端末数が 4 の場合の,遮へい頻度と無 線 LAN システムの伝送速度の関係を示す.ここで, スループットは1端末当りの平均スループットを表し, 遮へい回避を目的とする構成(w/o signal processing) は,4端末が無線 LAN の1 チャネル帯域幅 16.6 MHz を時分割多重で共有している.また,遮へい頻度は無 線端末の周囲 360°を,90°ずつ4 方向に分割し,分 割したそれぞれ1 方向の光パスが遮へい物によって遮



Fig. 15 Relationship between shadowing rate and throughput.

断される確率のことである.図15より,干渉除去の 重み付け信号処理により同一チャネルのRF信号を用 いて,情報伝送を空間多重することが可能となり,従 来方式に比べ約3.8倍のスループットの改善が得られ た.また,光路伝搬路が遮へいされた場合でも,伝搬 路行列の階数分の同一チャネルのRF信号を用いた情 報伝送の空間多重が可能であるため,高い遮へい頻度 環境においても無線周波数の効率的利用が行える.

9. む す び

本論文では,無線信号を光搬送波の強度にアナログ 形式のまま重畳して広帯域伝送を行う Radio on Free Space Optics において,同じ信号で変調された光波 を凸面鏡を用いて受動的に拡散し,遮へいによるリン ク瞬断を回避しつつ室内に形成する無線サービスエリ ア内での空間多重を可能とするシステムを提案した. 提案方式がもたらす受信光電力の分散効果,遮へいの 回避効果,実効伝送速度の改善効果,並びに空間多重 の適用によるマクロダイバーシチ効果を計算機シミュ レーションにより評価した.

本論文では,上りリンクの受信信号から得られる伝 搬路パラメータ推定が理想的に行われるものと仮定し て下りリンクに焦点を絞り特性評価を行った.しかし, 上りリンクの受信信号の劣化によって伝搬路パラメー タ推定が不完全である場合や,端末側で狭指向ビーム が使用できない場合の上りリンクの特性評価が残され ている.これらについては今後の検討課題としたい.

謝辞 本研究は総務省 平成 17 年度戦略的情報通 信研究開発制度(SCOPE-S)の委託により実施した ものである.

文 献

- Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE Std. 802.11b-1999.
- [2] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High-speed Physical Layer Extension in the 5 GHz Band, IEEE Std. 802.11a-1999.
- [3] J.M. Kahn, "Modeling of nondirected wireless infrared channels," ICC'96, pp.1227–1231, 1996.
- [4] J.R. Barry, J.M. Kahn, E.A. Lee, and D.G. Messerschmitt, "High-speed nondirective optical communication for wireless networks," IEEE Net. Magazine, vol.5, no.6, pp.44–54, Nov. 1991.
- [5] S. Jivkova and M. Kavehrad, "Receiver designs and channel characterization for multi-spot high-bitrate wireless infrared communications," IEEE Trans. Commun., vol.49, no.12, pp.2145–2153, Dec. 2001.
- [6] T. Ohtsuki, "Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications," IEEE Commun. Mag., vol.53, no.10, pp.74–79, March 2003.
- [7] K. Kazaura, K. Omae, T. Suzuki, M. Matsumoto, T. Sato, M. Hatori, T. Murakami, K. Takahashi, H. Matsumoto, K. Wakamori, and Y. Arimoto, "Study of the free-space optical communication systems with transparency of fiber (3) — Scintillation measurement for FSO communication system," 信学ソ大, B-5-134, Sept. 2005.
- [8] M. Kamei, T. Higashino, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "Spectrum delivery function in distributed antenna system using radio on free space optics for indoor WLAN," IEICE Electronics Express, vol.4, no.2, pp.54–59, 2007.
- [9] 塚本勝俊, "光ファイバ無線(RoF)とその応用," 信学技 報, OCS2002, Oct. 2002.
- [10] 宮岡克弥,宮本伸一,森永規彦,"赤外線無線中継器を用いた指向直射室内赤外線無線LANシステムのカバレッジに関する一検討",2003 信学総大,B-5-328, March 2003.
- [11] 佐藤章博,大槻知明,笹瀬 巌,"サイトダイバーシチを用 いた無指向性直射室内赤外線無線通信システムの光路しゃ へいに関する一検討"信学論(B),vol.J83-B, no.12, pp.1692-1701, Dec. 2000.
- [12] 岡村周太,岡田 実,小牧省三,"遍在アンテナを用いた 高速無線アクセスシステムの周波数利用効率改善効果" 信学技報,MoMuC2001,Nov. 2001.
- [13] 米澤和憲,岡村周太,塚本勝俊,小牧省三,"プレ重み 付け複局同時送信による遍在アンテナシステムのダウン リンクにおける同一周波数空間多重の提案",信学技報, RCS2002-52, May 2002.
- [14] F.R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," Proc. IEEE, vol.67, no.11, pp.1474–1486, Nov. 1979.
- [15] J.M. Kahn and J.R. Barry, "Wireless infrared com-

munications," Proc. IEEE, vol.85, no.2, pp.265–298, Feb. 1997.

- [16] International Electrotechnical Commission, Safety of laser products — Part 12: Safety of free space optical communication systems used for transmission of information, IEC 60825-12 Ed. 1.0: 2005 (b).
- [17] 日本規格協会, レーザ製品の安全基準, JIS C 6802: 2005.
- [18] J.R. Barry, Wireless Infrared Communications, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994.
- [19] X. Ning, R. Winston, and J. O'Gallagher, "Dielectric totally internally reflecting concentrators," Appl. Opt., vol.26, no.2, pp.300–305, Jan. 1987.
- [20] M. Born and E. Wolf, Principles of optics, Pergamon Press, 1970.
- [21] R.G. Smith and S.D. Personick, "Receiver design for optical communication systems," in Semiconductor Device for Optical Communication, Ch.4, New York, Springer-Verlag, 1980.
- [22] Y. Tanaka, K. Tomioka, M. Takano, and M. Nakagawa, "Wireless CATV uplink system with subcarrier modulation using infrared communications for apartment houses," IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.12, pp.3235–3242, Dec. 2001.
- [23] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz band, IEEE Std. 802.11g-2003.

(平成 19 年 5 月 7 日受付, 8 月 20 日再受付)



東野 武史 (正員)

平 13 阪大・工・通信卒.平 14 同大大学 院博士前期課程了.平 17 同大学院博士後 期課程了.現在,同大学院工学研究科電気 電子情報工学専攻助教.工博.光通信方式, 無線通信方式の研究に従事.IEEE 会員.



塚本 勝俊 (正員)

昭 57 阪大・工・通信卒.昭 59 同大大 学院修士課程了.同大・工・助手,講師を 経て,現在,同准教授.光通信方式,無線 通信方式,光電波融合通信方式の研究に従 事.工博.ITE,IEEE 会員.平8本会論 文賞,平16 同業績賞受賞.



小牧 省三

昭45 阪大・工・通信卒.昭47 同大大学 院修士課程了.同年電電公社(現,NTT) 電気通信研究所入社.平2 阪大・工・通信・ 助教授,平4 同教授,ディジタル無線通信 方式並びに光通信方式の研究に従事.工博. 昭50 本会論文賞,平5 同業績賞.平15

総務省近畿総合通信局電波の日記念表彰.



稲垣 惠三 (正員)

昭 60 京大・工・電気第二卒.昭 62 同大 大学院修士課程了.同年(株)国際電気通 信基礎技術研究所入社.光衛星間通信,光 信号処理アレーアンテナ,ファイバ無線シ ステム,光ジャイロの研究に従事.



熊本 和夫 (正員)

平 10 阪大・工・通信卒.平 11 同大大学 院博士前期課程了.平 14 同大学院博士後 期課程了.現在,大阪工業大学工学部電子 情報通信工学科講師.工博.光無線融合通 信の研究に従事.



安川 交二 (正員)

昭 45 阪大・工・通信卒.昭 50 同大大 学院博士課程了.工博.同年 KDD 研究 所入所.アンテナ・伝搬の研究に従事.昭 60ATR 設立準備会を経て ATR 光電波研 究所無線通信第一研究室長.光衛星間通信, 高機能アンテナ等の研究に従事.平 6KDD

グローバルマルチメディア事業部次長.CATV インターネット の開発・事業化に従事.平13 大阪工業大学教授.広帯域無線 信号のファイバー伝送に関する研究などに従事.