OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

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

東野　武史[†]　塚本　勝俊[†]　小牧　省三[†]　稲垣　恵三[††]
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，1 Gbit/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
[†††] 大阪工業大学，大阪市
Osaka Institute of Technology, Osaka-shi, 535–8585 Japan

 © (社)電子情報通信学会 2008

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．

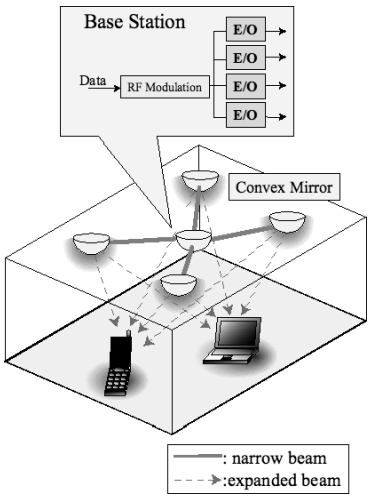


図 1　遮へい回避を目的とした提案システム構成
Fig. 1　Configuration of proposed system for shadowing reduction.

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

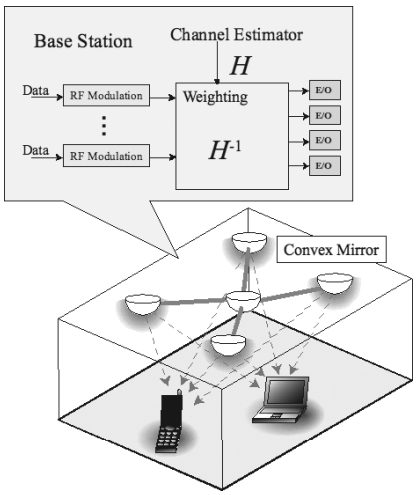


図 2　空間多重を目的とした提案システム構成
Fig. 2　Configuration of proposed system for space division multiplexing.

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 $\boldsymbol{H}$ の逆行列 $\boldsymbol{H^{-1}}$ で RF 信号の重み付けを行う．$\boldsymbol{H}$ 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 $\boldsymbol{r} = [r_1, r_2, ...r_M]^{\mathrm{T}}$ は，各無線端末への重み付け前の送信信号を $\boldsymbol{s} = [s_1, s_2, ...s_N]^{\mathrm{T}}$，重み付け後の送信信号を，$\boldsymbol{s'} = [s'_1, s'_2, ...s'_N]^{\mathrm{T}}$，各無線端末で発生する雑音を，$\boldsymbol{z} = [z_1, z_2, ...z_N]^{\mathrm{T}}$，とすると，

$$\begin{aligned} \boldsymbol{r} &= C\boldsymbol{H}\boldsymbol{s'} + \boldsymbol{z} = C\boldsymbol{H}\boldsymbol{H^{-1}}\boldsymbol{s} + \boldsymbol{z} \\ &= C\boldsymbol{I}\boldsymbol{s} + \boldsymbol{z} \end{aligned} \qquad (1)$$

となる．ここで，$\boldsymbol{I}$ は $M \times M$ 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 $\boldsymbol{H}$ は，

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

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 $\boldsymbol{H}$ 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，上り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 $\alpha_h = 60\,[\mathrm{deg}]$ のとき $l=1$，$\alpha_h = 45\,[\mathrm{deg}]$ のとき $l=2$，$\alpha_h = 10\,[\mathrm{deg}]$ 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 10 cm 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 10 cm 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，

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

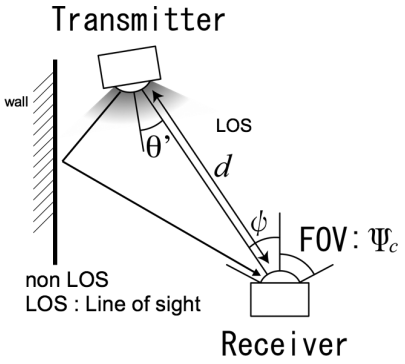


図 3 無指向直射方式における伝搬路モデル
Fig. 3 Optical propagation model of diffuse directed method.

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，

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

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，

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

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．

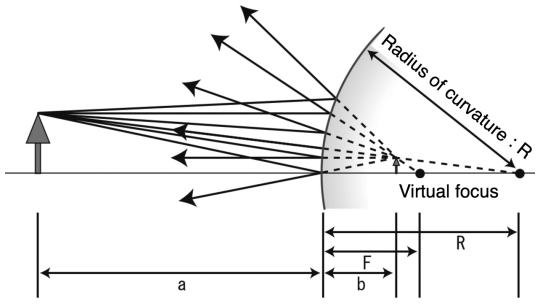


図 4　凸面鏡による光の反射
Fig. 4　Optical reflection by convex mirror.

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 $\sigma^2_{\rm total}$ は，

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

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 $\sigma^2_{\rm shot}$ は，

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

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 $\sigma^2_{\rm thermal}$ は，

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

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，

$$P_r=S_0P_t \tag{12}$$

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，

$$\begin{aligned} < s_r^2(t) > &= < (\eta P_t S_0 \beta s(t))^2 > \\ &= (\eta P_t S_0 \beta)^2 < s^2(t) > \end{aligned} \tag{15}$$

となる．ここで，$< \cdot >$ 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，

$$\mathrm{CNR} = \frac{< s_r^2(t) >}{\sigma_{\mathrm{total}}^2} = \frac{(\eta P_t S_0 \beta)^2 < s^2(t) >}{\sigma_{\mathrm{total}}^2} \tag{16}$$

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 1 m）と，通話時に耳元で使用する状況（高さ 1.5 m）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 4 km 毎時で，移動方向はラ

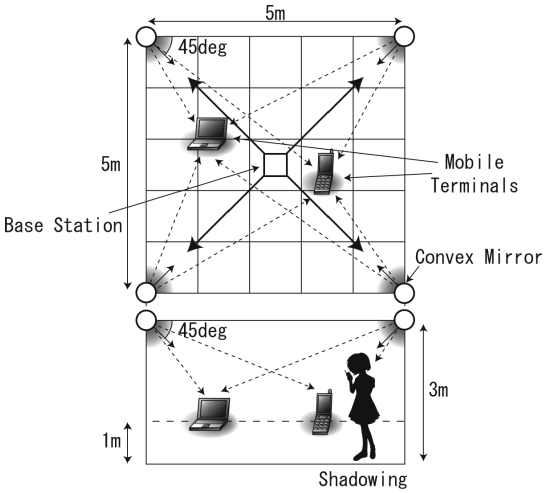


図 5　シミュレーションモデル（分散点 4）
Fig. 5　Simulation model (4 points).

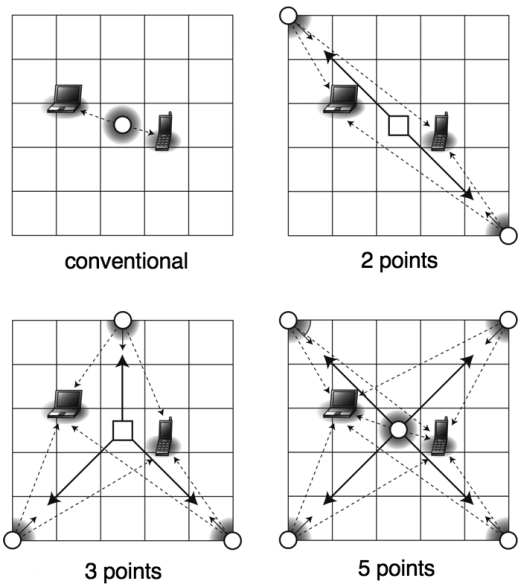


図 6　凸面鏡配置モデル
Fig. 6　Alignment of convex mirror.

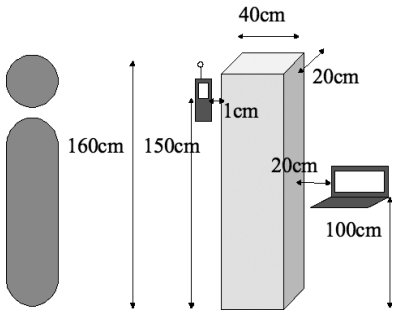


図 7　人のモデルと端末の高さ
Fig. 7　Human model as an obstacle and height of terminal.

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 [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 [deg]
光源半値角（従来方式）	40.0 [deg]
凸面鏡曲率半径	26.8 [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 [cm^2]
光波長フィルタ透過率	1.0
背景光電力	0.001 [mW/cm^2]
PD 量子効率	0.8 [A/W]
受信機雑音温度	300 [K]
負荷抵抗	50.0 [Ω]

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 [MHz]
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 [μs]
ガード区間長	0.8 [μs]
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.

伝送モード	変調方式	符号化率	最大伝送速度 [Mbps]	所要 CN 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，IEEE802.11 g [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 1 m 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 −30 dBm/cm^2 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 −45 dBm/cm^2 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

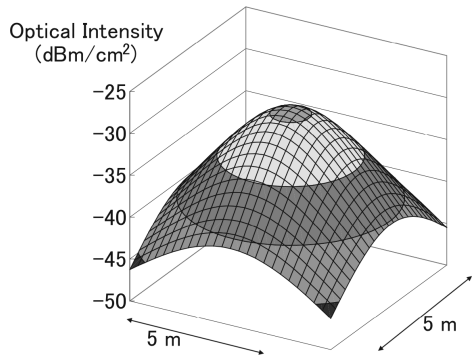


図 8　従来方式を用いた場合の光強度分布（端末高さ 1 m）
Fig. 8　Optical intensity distribution of conventional method (height of terminal = 1 m).

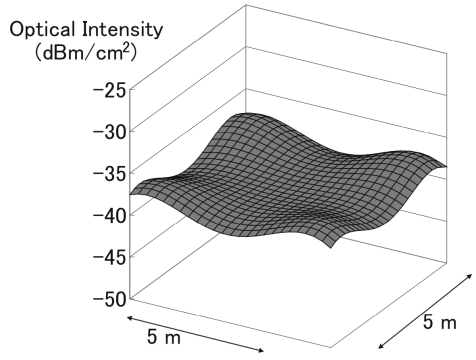


図 9　提案方式（分散点 4）の場合の光強度分布（端末高さ 1 m）
Fig. 9　Optical intensity distribution of proposed method (4 points, height of terminal = 1 m)

源を用いながらも，サービスエリア全体で光強度を $-40\,\mathrm{dBm/cm^2}$ 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 1 m 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．

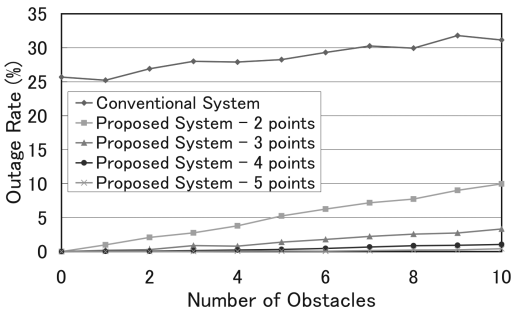


図 10　遮へい物による通信遮断確率（端末高 1 m）
Fig. 10　Outage rate due to obstacles (height of terminal = 1 m).

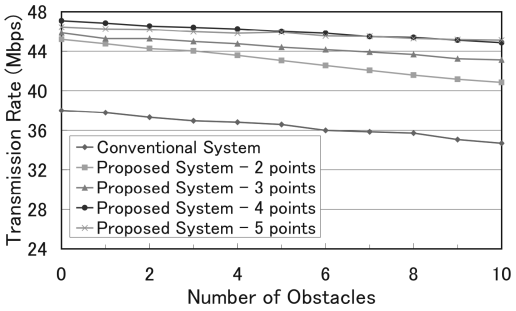


図 11　遮へい物の数と平均伝送速度（端末高 1 m）
Fig. 11　Relationship between the number of obstacles and average throughput (height of terminal =1 m).

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，IEEE802.11 g 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

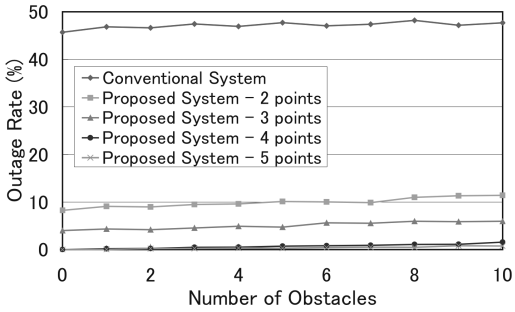


図 12　遮へい物による通信遮断確率（端末高 1.5 m）
Fig. 12　Outage rate due to obstacles (height of terminla = 1.5 m).

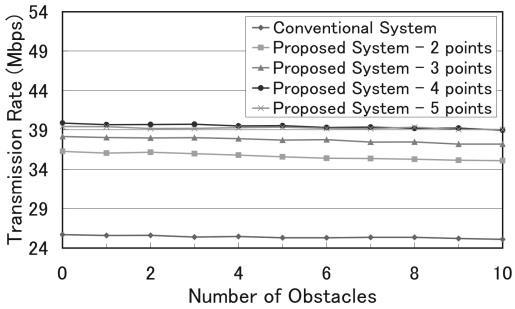


図 13　遮へい物の数と平均伝送速度（端末高 1.5 m）
Fig. 13　Relationship between the number of obstacles and average throughput (height of terminal =1.5 m).

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 1.5 m で頭部から 4 cm 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 1.5 m 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．

7. 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 1 m 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 20 dB 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 proccesing）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 proccesing）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 5 dB 低くてよいことが分かる．

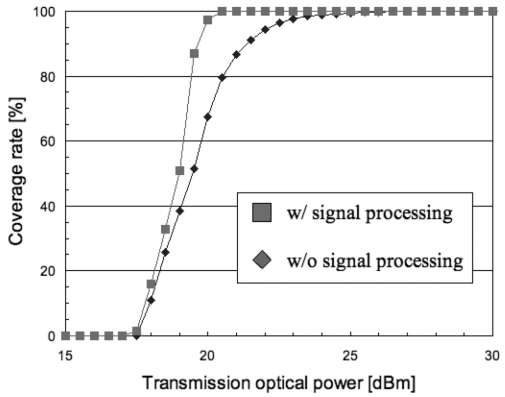


図 14　光送信電力とエリアカバー率
Fig. 14　Relationship between transmission optical power and area coverage.

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

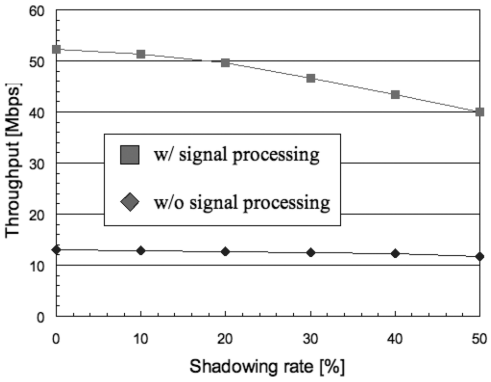


図 15　遮へい率に対する実効伝送速度
Fig. 15　Relationship between shadowing rate and throughput.

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．

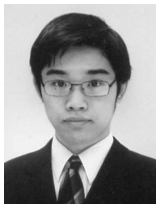
謝辞　本研究は総務省　平成 17 年度戦略的情報通信研究開発制度（SCOPE-S）の委託により実施したものである．

文　献

[1] 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-bit-rate 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　恵三　（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．