

擬似 MIMO センサを用いた屋内侵入検出システムの特性評価

小川 研^{†a)} 黒崎 雄太[†] 山田 寛喜^{†b)} 山口 芳雄[†]Performance Evaluation of System with Quasi MIMO Sensor
for Indoor Intrusion DetectionKen OGAWA^{†a)}, Yuta KUROSAKI[†], Hiroyoshi YAMADA^{†b)},
and Yoshio YAMAGUCHI[†]

あらまし 近年、アレーアンテナや MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) システムを用いた屋内侵入検出の研究が注目を集めている。これらのシステムでは、空間シグネチャやチャネル行列など、受信電界強度のみではなく電波伝搬環境変動の検出に着目した手法であり、その精度や安定性の観点からも実用性が高いものといえる。これまでは通常の MIMO 通信に準じてチャネル推定を利用したシステムの検討が中心的に進められてきていたが、それではハードウェア・システム構成が複雑化するといった問題が挙げられる。また、各送信素子を有線接続する必要があるために送信素子を分散配置することが難しい。本論文では各送信素子を独立に動作させて受信するシステムを提案し、従来手法との検出特性の比較検討を通して、その有効性を明らかにしている。

キーワード アレーアンテナ, MIMO センサ, チャネル推定, 信号部分空間, 侵入検出

1. ま え が き

電波を利用したセンサに関する検討は以前からいくつか提案 (例えば [1], [2]) されており、これらは、電波伝搬が人の動きなどの環境変動に敏感であり [3]~[6], 見通し外の変動も検出が可能であるという、電波特有の性質に着目したものである。しかし、それらは赤外線センサやビデオカメラのように広く用いられるまでには至っていない。その主な理由は、それらのシステムのほとんどは強度検出に基づいており、システム自体の安定性に対して敏感すぎるという問題点を有しているためである [1].

しかしながら、近年、アレーアンテナや MIMO 通信の普及に伴い、受信電界強度の変化のみならず空間的な伝搬変動情報を検出するシステムが多数提案されてきた。その中でも代表的なものとして、受信側にアレーアンテナを用いた SIMO (Single-Input, Multiple-Output) センサによる検出システムがあ

る [7]. これは、アレーアンテナにおける受信信号部分空間、すなわち空間シグネチャを利用したシステムである。コヒーレント合成された信号部分空間内には到来波数、遅延時間差、電力レベル等の情報が含まれており、受信電界強度の変化のみを検出する SISO (Single-Input, Single-Output) センサよりロバストな動作が期待できる。また、更なる性能の向上を目指して SIMO センサを拡張させた MIMO センサによる検出システムが提案されている [8], [10]. そのシステムでは通常の MIMO 通信に準じた検出を行っているために高性能な検出が期待できるが、トレーニングシンボルによるチャネル推定が必要となる。このシステムにおいて検出性能の改善を図るには、各送信素子を分散配置することが望ましいと報告されている [9]. MIMO 構成において送信素子を分散配置する場合、送信アレーの配線、すなわちケーブルの処理が問題となる。したがって、通信システムと併用しない、侵入検出専用のシステムならば、各送信素子が独立に動作するシステムが望ましい。

そこで本論文では、各送信素子を独立に動作させ各送信素子ごとに単独で受信するシステムを用いて侵入検出を行う、擬似 MIMO 構成の検出システムを提案する。ここでは SIMO センサ [7] と同様に個々の送信

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
2-8050 Ikarashi, Nishi-ku, Niigata-shi, 950-2181 Japan
a) E-mail: ogawa@wave.ie.niigata-u.ac.jp
b) E-mail: yamada@ie.niigata-u.ac.jp

素子に対する空間シグネチャを推定することにより検出を行う。ただし、単なる複数の SIMO センサにより実現される検出性能ではなく、MIMO センサに準じた検出性能を実現する工夫を施している点が特徴である。このようなシステムの場合、各送信素子同士は互いに通信を行う必要も有線で接続される必要もなく、各素子は電池駆動させることも可能となる。そのため、従来の MIMO 構成による検出システムと比較して簡素なシステムの実現が可能となる。

本論文では、提案したシステムの有効性を、レイトレス法に基づく計算機シミュレーションによる従来手法 (SIMO, MIMO) との特性比較を通して明らかにする。本論文の構成は以下のとおりである。まず、2. では本論文で想定する屋内侵入検出システムにおける、受信データベクトル、そして各検出アルゴリズムの定式化を行う。3. では各侵入検出手法の特性評価を比較し、提案手法の有効性を示す。4. では本論文をまとめ、今後の課題を述べる。

2. 屋内侵入検出システム

本論文で利用する電波センサは、屋内マルチパス伝搬環境内で分散的に複数配置された送信素子からの信号を、アレーアンテナで受信することを想定している。これは、送受信間の多数のマルチパス伝搬経路が屋内をくまなく網羅するほど、侵入等のイベントによって電波伝搬経路が変動する確率が高くなり、その検出性能が向上するためである。しかしその反面、1. で述べたように一般的な MIMO 通信に準じたシステムでは素子配置の柔軟性の点で問題が生じる。そこで、本論文では、各送信素子からトレーニング信号を用いず独立に送信を行う、複数の SIMO 構成からなる擬似 MIMO 構成を提案する。この送信方式ではトレーニング信号を用いないため、送信チャンネル間の位相が不定となる。不定となる位相の推定値を用いて補正し、擬似的に MIMO チャンネル推定を実現している点が、位相補正を行わない複数の SIMO 構成とは異なる点である。

2.1 受信データモデル

分散配置する送信素子を M 素子、リニア配置する受信素子を N 素子用いる構成を想定した場合、時刻 t において m 番目送信素子から得られる受信データベクトルは以下の式で定義する。

$$\mathbf{y}_m(t) = \mathbf{h}_m(t)s_m(t) + \mathbf{n}_m(t), m=1, \dots, M \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(t) = [\mathbf{h}_1(t), \dots, \mathbf{h}_M(t)] \quad (2)$$

ここで $\mathbf{h}_m(t)$ は m 番目送信素子から受信機への伝搬チャネルベクトル、 $s_m(t)$ は送信信号、 $\mathbf{n}_m(t)$ は平均 0、分散 σ^2 の白色ガウス雑音を要素としたベクトル、 $\mathbf{H}(t)$ はチャネル行列であり、 $\mathbf{h}_m(t)$ や $\mathbf{n}_m(t)$ は各々 N 次元列ベクトルである。以降、本論文では侵入の有無によって表記を区別させる必要があるため、侵入がある状態を時刻 t 、侵入がない状態のデータを $t=0$ を代入した形で表現する。

2.2 従来手法

2.2.1 SIMO 構成による検出手法 [7]

送信 1 素子、受信多素子の SIMO 構成による検出システム [7] では、アレー素子の受信データ関連行列を固有値展開したときの、第一固有ベクトルの変化から侵入検出を行っている。これは、侵入行為による素波の遮断や相関抑圧効果は第一固有ベクトルに最も大きな影響を与え変動を生じさせることを利用している。式 (1) で表される受信データベクトルから関連行列 $\mathbf{R}^{(m)}$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^{(m)} &= \mathbb{E} [\mathbf{y}_m(t)\mathbf{y}_m(t)^H] \\ &= \sum_{n=1}^N \lambda_n^{(m)} \mathbf{e}_n^{(m)} \mathbf{e}_n^{(m)H} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $\mathbb{E}[\cdot]$ はアンサンブル平均であり表 3 に示すスナップショット数で平均をとっている。 H は複素共役転置を表す。また、 $\lambda_n^{(m)}$ は m 番目送信アンテナにおける第 n 固有値であり、 $\mathbf{e}_n^{(m)}$ はそれに対応する固有ベクトルである。ただし、受信環境がマルチパスリッチである場合、上記の固有値 $\lambda_n^{(m)}$ と第一固有ベクトル $\mathbf{e}_1^{(m)}$ は以下の関係を満たすことが知られている [7]。

$$\lambda_1^{(m)} > \lambda_2^{(m)} = \dots = \lambda_N^{(m)} = \sigma^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_1^{(m)} \propto \mathbf{h}_m(t) \quad (5)$$

侵入検出を可能とするパラメータは式 (1) における $\mathbf{h}_m(t)$ であるが、この手法では式 (5) で示すように、相似関係である $\mathbf{e}_1^{(m)}$ を推定することで検出を可能としている。そして、式 (3) によって得られる $\mathbf{e}_1^{(m)}$ を用いて、評価式は以下のように定義される。

$$\rho_E(t) = \left| \mathbf{e}_1^{(m)H}(0) \mathbf{e}_1^{(m)}(t) \right| \quad (6)$$

本論文では以降、この手法を E-SIMO (Eigenvector SIMO) と呼ぶ。

2.2.2 MIMO 構成による検出手法 [8]

受信をアレーとし、推定されたチャネル行列 $\mathbf{H}(t)$ を用いて変動検出を行う MIMO 構成による検出システム [8] では、まず次式のようにトレーニング信号を用いたチャネル推定を行う。

$$\mathbf{h}_m = \frac{\mathbb{E}[\mathbf{y}_m(t)s_m^*(t)]}{\mathbb{E}[s_m(t)s_m^*(t)]} \quad (7)$$

ここで * は複素共役を示す。

各チャネル行列 $\mathbf{H}(0)$, $\mathbf{H}(t)$ の変動量は以下の式で評価される。

$$\rho(t) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M h_{nm}^*(0)h_{nm}(t) \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |h_{nm}(0)|^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |h_{nm}(t)|^2}} \quad (8)$$

ここで $h_{nm}(0)$, $h_{nm}(t)$ は各行列の構成要素である。上式は時間相関変動を検出しており、自身の大きさで正規化していることから評価値は環境変動がない場合は 1 となり、送信電力自体の変動に対してロバストであることが分かる。言うまでもなく、侵入がある場合はその変動量に応じて低い値となる。

式 (8) に加えて、本論文ではチャネル変動自体を差分で評価する次式の特性も比較検討することとする。

$$\rho(t) = \|\mathbf{H}(0) - \mathbf{H}(t)\|_F \quad (9)$$

ここで $\|\cdot\|_F$ はフロベニウスノルムを示す。式 (9) は差分のフロベニウスノルムを用いた評価式であり、振幅情報すなわち受信電界強度の変化自体を利用しており、そのために高い検出性能の実現が期待できる。しかし、先の式 (7) から推定されるチャネル \mathbf{h}_m は送信電力レベルに応じて変動することが分かる。今、 \mathbf{h}_m の推定値を $\hat{\mathbf{h}}_m$ とし、実際の送信信号 $s'_m(t)$ がチャネル推定に用いた送信信号 (既知と想定) $s_m(t)$ に対して $s'_m(t) = ks_m(t)$ ($k \neq 1$) の関係を有していた、すなわち振幅が変動したとすれば

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_m &= \frac{\mathbb{E}[\mathbf{y}_m(t)s_m^*(t)]}{\mathbb{E}[s_m(t)s_m^*(t)]} \\ &= \frac{\mathbb{E}[\mathbf{h}_m(t)s'_m(t)s_m^*(t)]}{\mathbb{E}[s_m(t)s_m^*(t)]} + \frac{\mathbb{E}[\mathbf{n}_m(t)s_m^*(t)]}{\mathbb{E}[s_m(t)s_m^*(t)]} \\ &= k\mathbf{h}_m \end{aligned} \quad (10)$$

となる。すなわち送信信号電力の変動は直接チャネル

成分の変動となり、式 (9) の評価式では実際には伝搬経路変動が存在しない場合であっても、変動ありと誤検出されることになる。この事は、1. で述べた従来法と同質の問題点である。一方、式 (8) の評価式を用いた場合は各送信チャネルは自身の電力で正規化されるため、上記のような定数倍すなわち送信電力の変動に対して安定した性能を発揮することができるものと考えられる。

以降、本論文では式 (8) に適用した手法を CC-MIMO (Channel-Correlation MIMO)、式 (9) に適用した手法を CD-MIMO (Channel-Difference MIMO) と呼ぶ。

2.3 提案手法

2.2.1 で示した SIMO 構成による検出手法は、信号部分空間を用いるためチャネル推定 (トレーニング信号) が不要であるという特徴がある。しかし複数の送信素子それぞれの信号に対して同様の処理 (M 個の SIMO 構成システム) を施しても、信号部分空間 (固有ベクトル) に含まれる各送信チャネルの位相の不定性のため、MIMO 相当の特性は実現できない。そこで本論文では、信号部分空間の差 $\|e_1^{(m)}(0) - \alpha_m e_1^{(m)}(t)\|$ ($\|\cdot\|$ はユークリッドノルム) を最小化する位相係数 α_m を用いて位相の不定性を除去した擬似 MIMO 構成システムを提案する。このシステムにおける位相係数 α_m 、チャネル行列に準ずる信号部分空間行列 $\mathbf{V}(0)$, $\mathbf{V}(t)$ は以下の式で与えられる。

$$\alpha_m = \exp(-j \arg(e_1^{(m)}(0)^H e_1^{(m)}(t))) \quad (11)$$

$$\mathbf{V}(0) = [e_1^{(1)}(0), \dots, e_1^{(M)}(0)] \quad (12)$$

$$\mathbf{V}(t) = [\alpha_1 e_1^{(1)}(t), \dots, \alpha_M e_1^{(M)}(t)] \quad (13)$$

前節同様、信号部分空間の変動量を評価する際は式 (8), (9) を用いる。以降、本論文では $\mathbf{V}(0)$, $\mathbf{V}(t)$ を $\mathbf{H}(0)$, $\mathbf{H}(t)$ に置き換えて、式 (8) に適用した手法を SC-MIMO (Signal-subspace-Correlation-MIMO)、式 (9) に適用した手法を SD-MIMO (Signal-subspace-Difference-MIMO) と呼ぶ。

3. 計算機シミュレーションによる特性評価

提案手法の有効性を示すために、レイトレース法に基づく計算機シミュレーションにより特性評価を行う。

3.1 シミュレーションモデル

本論文における計算機シミュレーションでは、縦

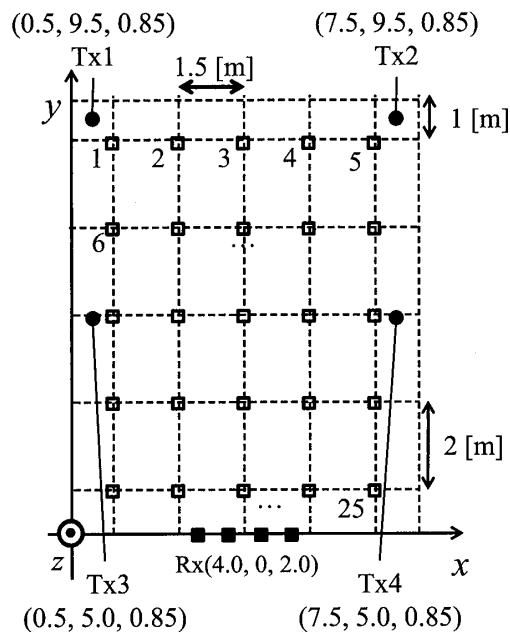


図 1 評価モデル
Fig.1 Evaluation model.

表 1 屋内環境モデル諸元
Table 1 Parameters of indoor model.

形状 (縦 × 横 × 高さ)	10×8×2.7 [m]
比誘電率	6.25 [F/m]
導電率	0.0814 [S/m]

表 2 侵入者モデル諸元
Table 2 Parameters of intruder model.

形状 (縦 × 横 × 高さ)	0.3×0.3×1.7 [m]
比誘電率	42.1 [F/m]
導電率	0.514 [S/m]

表 3 計算機シミュレーション諸元
Table 3 Simulation parameters.

受信アレー形状	ULA
受信アレー素子数	2,4
周波数	2.4 [GHz]
SNR	-10~40 [dB]
最大反射回数	5
スナップショット数	50
試行回数	10000
受信アレー素子間隔	0.5λ

10 [m], 横 8 [m], 高さ 2.7 [m] のコンクリート壁で覆われた屋内環境を想定し, $x = 4.0$ を軸として左右対称とした. 評価を行う際は侵入者に見立てた誘電体モデルを屋内環境モデル内の評価点に配置した. なお, 壁や侵入者の比誘電率, 導電率は文献 [11], [12] を参考に決定した. 図 1 に送受信素子位置と評価位置を, 表 1 に屋内環境モデル諸元, 表 2 に侵入者モデル諸元, 表 3 に計算機シミュレーション諸元を示す. 受信アレー素子の位相中心は $(x, y, z) = (4.0, 0.0, 2.0)$ となるように, また, 受信素子間隔は半波長となるように配置した. これまでの検討から受信素子を分散配置することにより検出性能が改善される事が報告されている (例えば文献 [9]). 検出性能向上にはそのような工夫も有効といえる. ただし, 受信アレー長の増大は設置場所の問題を引き起こし, 実用上はあまり好ましいものとはいえない. 今回の検討では, 今後予定している 2.4 GHz 帯での実験においてアレー長を (4 素子で) 20 cm 程度とするため素子間隔を半波長とした.

また今回の検討では, 今後, 実伝搬環境における各手法の検出性能の比較実験を予定しているため 2.4 GHz 帯を用いることにした. 本論文の屋内侵入検出システムの特性評価においては, 変動検出の評価式の検討に限定している. したがって, 変調方式やプロトコルに依存しない点に注意されたい. なお, 2.4 GHz 帯では他システムの干渉が問題となることも予想される.

干渉対策 (他の周波数帯の利用も含む) など具体的な運用プロトコルは今後の課題である.

また, 計算機シミュレーションにおいて送信 2 素子で評価を行う際は, Tx1, Tx2 を用いた. なお, 用いる送受信素子はダイポールであり, 総送信電力は一定の条件下で評価した.

3.2 評価方法

侵入検出システムの特性評価において重要となるのが, その評価方法である. これまでも検出確率に関する検討は行われてきており, 例えば, 文献 [8], [9] では SNR (Signal to Noise Ratio) に対するしきい値テーブルを作り評価値との大小関係から検出確率を算出している. このようなシステムの厳密な評価は, 検出パラメータの確率密度関数 (PDF: Probability Density Function) を導出し, 与えられた誤警報確率あるいはそれを実現するしきい値に対する検出確率を評価するべきである. しかしながら現時点ではいまだ十分に理論的/定量的な結果を得るには至っておらず, その点は今後の課題である. 本論文では相対的な比較を行う目的に限定し, 図 2 (a), (b) で示すような PDF を用いた簡易的な評価方法を採用している. 図 2 (a), (b) はあくまで簡易的な図であり, 計算機シミュレーションから得られる実際の図に関しては 3.3 の図 3~図 6 にて示す. 図 2 (a), (b) のようなヒストグラムは, 侵入がある状態, ない状態において各々 10000 回の評価を行うことで得ることができ, SNR 環境によって形状

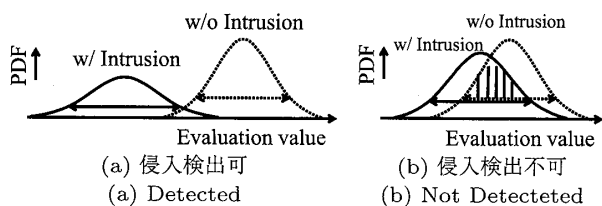


図 2 侵入検出可 (左)/侵入検出不可 (右)
Fig. 2 Detected (left)/Not detected (right).

が異なる. 図 2 (a), (b) は式 (8) で得られるヒストグラムを簡易的に図示している. つまり, SNR が高い状況だと侵入による変動が評価値に対して顕著な影響を与え, 正確な検出を行うことが可能であることを示しているのが図 2 (a) であり, SNR が低い環境では受信信号が雑音に埋もれてしまうために, 侵入の有無に関係なく評価値が近い値をとり正確な検出が難しいことを示しているのが図 2 (b) である. このように, 各状態における評価値の PDF から得られる区間に重複がない状態, つまり図 2 (a) のような状態を検出可能としており, その区間を平均値 $\pm 3 \times$ 標準偏差 ($= 3\sigma$) で定めている. この評価を各評価点で行い, 各 SNR における検出性能は検出場所率として評価した.

$$\text{検出場所率 [\%]} = \frac{\text{検出箇所 (1~25)}}{\text{評価点数 (= 25)}} \times 100 \quad (14)$$

以降の計算機シミュレーション結果では, 各 SNR において検出場所率 100% を達成する所要 SNR の値を比較して特性評価を行う.

なお, 本論文における計算機シミュレーションでの SNR は以下の式に表すように, 侵入がない状態の全受信電力対全雑音電力で定義している.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{m=1}^M (\mathbf{h}_m(0) \mathbf{s}_m(0))^H (\mathbf{h}_m(0) \mathbf{s}_m(0))}{\sum_{m=1}^M \mathbf{n}_m(0)^H \mathbf{n}_m(0)} \quad (15)$$

3.3 各検出アルゴリズムの評価値ヒストグラム

図 3~図 6 に, 図 2 で簡易的に示した評価値ヒストグラムの各アルゴリズムにおける数値計算例を示した. 計算モデルの SNR は図中の凡例のとおりである. 各々図 1 における評価点 1 に侵入者が存在する状態で MIMO システムの各手法を用いて得ることができる図であり「平均値 $\pm 3 \times$ 標準偏差の区間」が重複している部分は斜線を引くことや塗りつぶすことで表して

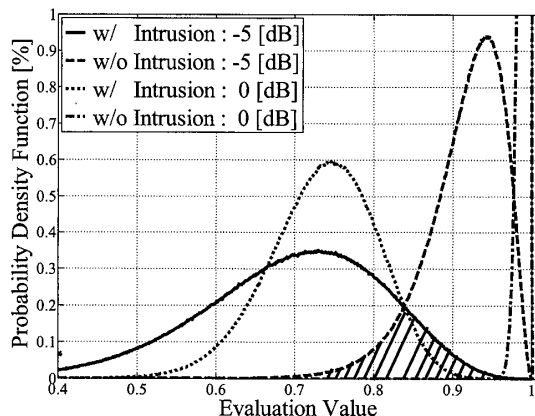


図 3 CC-MIMO における評価値 PDF
Fig. 3 PDF of evaluation value by CC-MIMO.

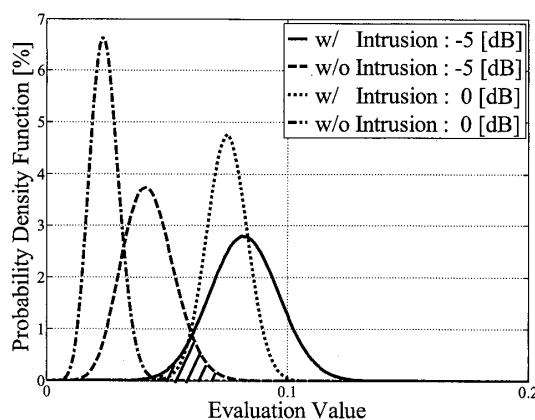


図 4 CD-MIMO における評価値 PDF
Fig. 4 PDF of evaluation value by CD-MIMO.

いる. また, 図中の dB 値は各グラフを描く際に用いた SNR を示している.

図 2 では, この論文における検出判定の概念を示すため正規分布的な PDF 波形を用いて説明したが, 具体的には図 3~図 6 に示すようにアルゴリズムや SNR により PDF の分布形状が変化することに注意されたい.

3.4 SIMO 構成による検出アルゴリズムの特性評価 (従来手法)

以降に示す MIMO 構成の検出システムと比較するため, 受信アレー素子数を 2 素子, 4 素子とした E-SIMO の特性評価結果を各々図 7, 図 8 に示し, 受信ダイバーシチ効果を確認する. 凡例内の dB 値は, 検出場所率 100% を達成する所要 SNR を示しており, この SNR は式 (15) で与えられる侵入者が存在しない状態での SNR である.

パス数や受信電界強度の観点から送信素子位置が検出性能に影響を与えることは自明である. 受信素子が

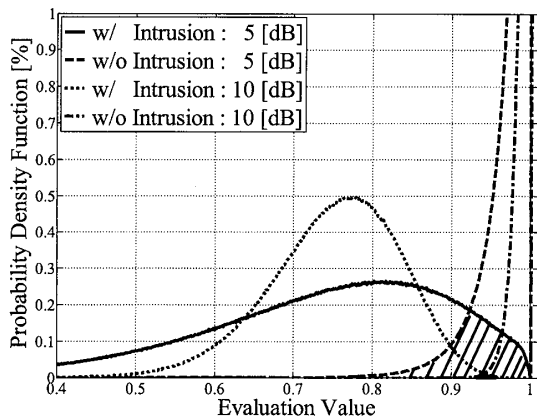


図 5 SC-MIMO における評価値 PDF
Fig. 5 PDF of evaluation value by SC-MIMO.

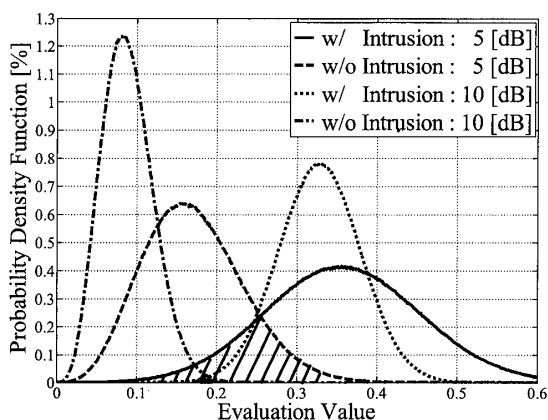


図 6 SD-MIMO における評価値 PDF
Fig. 6 PDF of evaluation value by CD-MIMO.

2 素子である図 7 では、どの送信素子からでも検出場所率 100%を達成するのに必要な SNR が 40 [dB] であることが分かる。一方、受信素子数を 4 素子に増やすと 20 [dB] で達成可能であることが図 8 から分かる。この結果から、本計算機シミュレーションの環境下においては受信素子を 4 素子程度用いることで安定した性能が発揮できることが分かった。

3.5 MIMO 構成による検出アルゴリズムの特性評価 (従来手法)

本節では CC-MIMO, CD-MIMO による検出特性評価結果を示し、チャネル推定を用いたシステムの素子構成あるいは評価式による検出性能の違いを確認する。結果は図 9 (CC-MIMO), 図 10 (CD-MIMO) に示した。MIMO 素子構成については図の凡例に $M \times N$ の形で示すように 4 種類の構成を評価した。特性評価基準は前節と同様である。

まず、前節と同様に CC/CD-MIMO の各評価結果における受信ダイバーシチ効果を確認する。図 9 にお

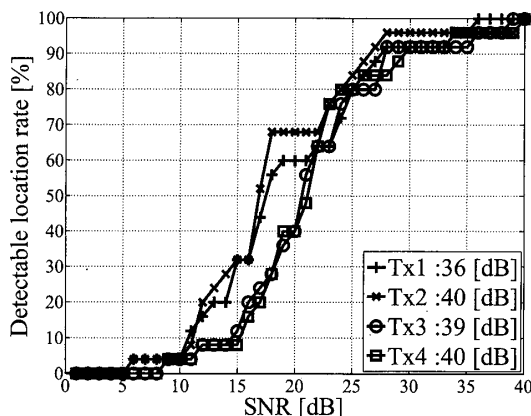


図 7 E-SIMO (受信 2 素子) における検出場所率
Fig. 7 Detectable location rate by E-SIMO (2-el.receiver).

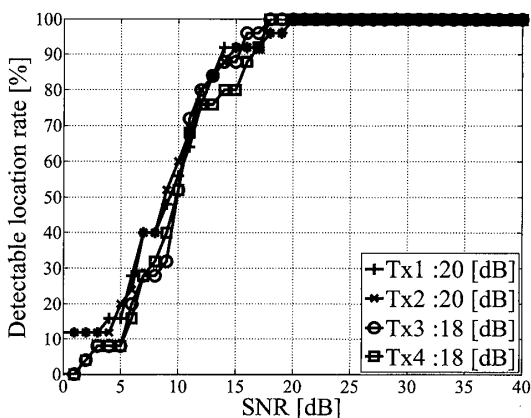


図 8 E-SIMO (受信 4 素子) における検出場所率
Fig. 8 Detectable location rate by E-SIMO (4-el.receiver).

いて、 2×2 及び 2×4 構成を比較すると 4 [dB] の改善が見られ、 4×2 及び 4×4 構成では 2 [dB] の改善が見られる。同様に、図 10 において 2×2 と 2×4 構成では 1 [dB], 4×2 と 4×4 構成では 1 [dB] の改善が見られる。次に、送信ダイバーシチ効果を確認する。図 9 において、 2×2 と 4×2 構成を比較すると 6 [dB], 2×4 と 4×4 構成では 2 [dB] の改善が見られる。同様に図 10 において、 2×2 と 4×2 構成では 5 [dB], 2×4 と 4×4 構成では 1 [dB] の改善が見られる。このように、送信/受信素子数を増やすことで性能が改善され安定した検出が可能になることが分かる。これは、次節で示す提案手法においても同様である。

次に、評価式による変化を確認する。検出場所率 100%を達成する SNR を図 9, 図 10 から比較すると、CD-MIMO にすることで性能が改善されていることが分かる。図 9 と図 10 における 2×2 構成を比較すると 4 [dB] の差がある。 2×4 では 1 [dB], 4×2 では

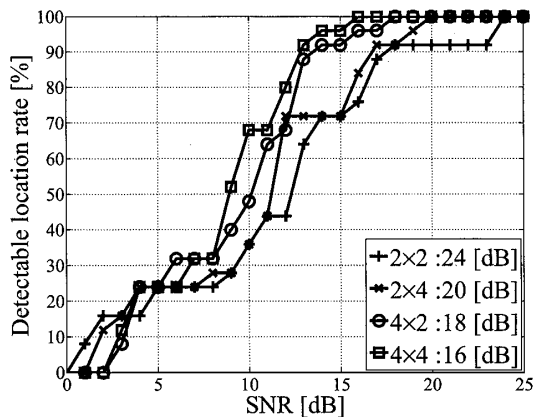


図 9 CC-MIMO における検出場所率
Fig. 9 Detectable location rate by CC-MIMO.

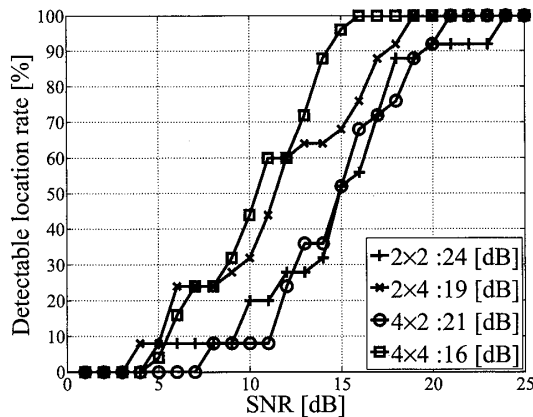


図 11 SC-MIMO における検出場所率
Fig. 11 Detectable location rate by SC-MIMO.

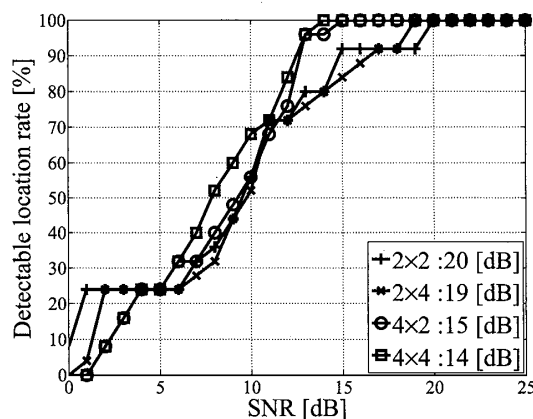


図 10 CD-MIMO における検出場所率
Fig. 10 Detectable location rate by CD-MIMO.

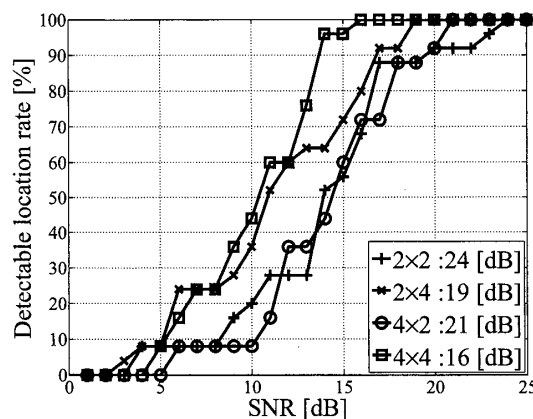


図 12 SD-MIMO における検出場所率
Fig. 12 Detectable location rate by SD-MIMO.

3 [dB], 4×4 では 2 [dB] の性能差がある。つまり、本計算機シミュレーションを実施した環境下においては CD-MIMO では 20 [dB] あればどの素子構成でも正確な検出が期待できることが分かる。このような結果が見られるのは、式 (9) から分かるように、CD-MIMO はチャンネルの電力情報 (振幅自体) を用いていることが原因であると考えられる。しかし、2.2.2 で述べたように、受信電界強度の利用は伝搬変動以外の要因で性能が左右されるという問題がある、という点に注意が必要といえる。

3.6 擬似 MIMO 構成による検出アルゴリズムの特性評価 (提案手法)

提案手法である SC-MIMO, SD-MIMO の検出特性評価結果を図 11, 図 12 に示す。本節では、これらと 3.4, 3.5 で示した評価結果との比較を行う。MIMO 素子構成, 特性評価基準は前節と同様である。

3.6.1 素子構成, 評価式による特性

ここでは、素子構成によるダイバーシチ効果, また

評価式による特性の違いを確認する。図 11, 図 12 から、提案手法においては相関と差分の双方の各評価式の結果に差異がないことが分かる。これは、チャンネル行列 $H(t)$ ではトレーニング信号を用いた推定を行うため各列ベクトルは (相対的な) 受信電界強度の情報を含んでいるが、提案手法では固有ベクトルを用いているため列ベクトルの大きさが正規化されているためである。

次に、受信/送信ダイバーシチ効果による性能改善を図 11 を利用して確認していく。2×2 と 2×4 構成を比較すると 5 [dB] の改善が見られ 4×2 と 4×4 構成でも 5 [dB] である。同様に 2×2 と 4×2 構成では 3 [dB], 2×4 と 4×4 構成は 3 [dB] の改善が確認できる。この結果から、前節と同様に受信/送信素子数を増やすことで性能が改善することが分かる。

3.6.2 E-SIMO の特性評価結果との比較

ここでは図 7, 図 8 と図 11 を比較して提案手法の有効性を示す。ここで、図 7, 図 8 では送信素子位置

によって性能差があるため、図 11 と比較するときは使用している素子で最も良好な値を示した素子の結果を用いる。つまり、図 11 の送信 2 素子と比較する場合は図 7、図 8 の Tx1, Tx2 の良好な値を、送信 4 素子と比較する場合は Tx1~Tx4 の良好な値を図 11 と比較する。

図 7 と図 11 の 2×2 構成を比較すると 12 [dB], 4×2 構成と比較すると 15 [dB] の改善が見られる。また、図 8 と図 11 の 2×4 構成を比較すると 1 [dB], 4×4 構成と比較すると 2 [dB] の改善が見られる。このように、提案手法のような擬似 MIMO 構成にすることで位相補正を行わない複数の SIMO 構成より優れた性能が実現されることが分かる。

3.6.3 CC/CD-MIMO の特性評価結果との比較

最後に、従来の MIMO 構成 (図 9, 図 10) と提案した擬似 MIMO 構成 (図 11, 図 12) を比較する。3.6.1 で述べたように、提案手法のシステムでは固有値展開による正規化が行われているため、相関と差分の評価方法 (SC/SD-MIMO) による性能差は認められず、CD-MIMO と比較するとその性能はやや劣化している。しかしながら 3.5 で述べているように CD-MIMO はロバスト性の点で問題があるものと考えられる。そのため、MIMO センサに求められるロバスト性の観点では提案手法を採用するメリットがある。また、SC-MIMO (図 11) と CC-MIMO (図 9) を比較すると $M \leq N$ の素子構成のときに同等の性能を示している。 $M > N$ のときに提案手法の性能が劣化しているのは、式 (11) に示したように、送信チャネル間の位相を推定しているためである。そのため、提案手法を利用するときは素子構成に注意する必要がある。

4. む す び

本論文では、複数の SIMO 構成からなる擬似 MIMO 構成の屋内侵入検出システムを提案し、これまで提案されてきた手法 (SIMO, MIMO) との特性評価結果を比較した。その結果、提案手法では SIMO 構成の組合せによる検出評価よりも性能が向上し、送信素子多素子化による相乗効果が得られることを確認した。またチャネル推定を用いたシステムと比較検討し、ロバスト性を重視したチャネル相関に基づく検出手法 (CC-MIMO) を用いる場合、 $M \leq N$ の素子構成ならば提案手法が同等の性能を示すことを明らかにした。

今回の検討は特定の伝搬環境を想定したものであり、

セキュリティシステムとしての詳細な定量的評価を行うには誤警報確率や見逃し検出確率等の検出確率問題の検討が不可欠である。更に、実際の運用では他の電波システムの干渉対策も問題となる。それらが今後の課題である。

謝辞 本研究は科研費 (基盤研究 (C)23560442) の助成により行われたものである。

文 献

- [1] 平澤徳仁, 鈴木康直, 馬杉正男, “無線 LAN ビーコン信号を用いた人検知方法に関する検討,” 2009 信学総大, B-20-26, March 2009.
- [2] 西 正博, 川口立朗, 高橋 茂, 吉田彰顕, “UHF 帯テレビ放送受信波を用いたヒト感知システムの提案,” 信学論 (B), vol.J89-B, no.9, pp.1789-1796, Sept. 2006.
- [3] 坂本雄児, 田村顕成, 畑 善之, “人体の移動が同一室内の 2.5 GHz 帯電波伝搬に与える影響,” 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.2, pp.110-116, Feb. 1996.
- [4] 太田喜元, 藤井輝也, “屋内・周辺移動環境下における受信レベル変動特性,” 信学技報, A-P2006-54, July 2006.
- [5] 西本 浩, 小川恭孝, 西森寿彦, 大鐘武雄, “屋内伝搬実験に基づく 2×2MIMO-SDN の特性評価,” 信学論 (B), vol.J87-B, no.9, pp.1442-1453, Sept. 2004.
- [6] 柏木一平, 多賀登喜雄, “屋内 2×2MIMO 伝送における人体パス遮蔽効果の検討,” 信学技報, A-P2008-208, Feb. 2009.
- [7] S. Ikeda, H. Tsuji, and T. Ohtsuki, “Indoor event detection with eigenvector spanning signal subspace for home or office security,” IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.7, pp.2406-2412, July 2009.
- [8] 小出悠太, 西森健太郎, 本間尚樹, 桑原大輝, 山田寛喜, 牧野秀夫, “実環境データに基づく MIMO センサに適した素子間隔の考察,” 信学技報, A-P2010-149, Jan. 2011.
- [9] 小出悠太, 西森健太郎, 本間尚樹, 桑原大輝, 山田寛喜, 牧野秀夫, “MIMO センサ—屋内実環境におけるアンテナ分散配置の効果,” 信学技報, A-P2010-77, Oct. 2010.
- [10] 杉浦貴史, 本間尚樹, 西森健太郎, “MIMO センサ—屋内環境における侵入検出精度のレイトレース解析,” 信学技報, A-P2010-76, Oct. 2010.
- [11] A.W. Guy, C.-K. Chou, and B. Neuhaus, “Average SAR and SAR distributions in man exposed to 450-MHz radiofrequency radiation,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-32, no.8, pp.752-762, Aug. 1984.
- [12] 小柳芳雄, 河井寛記, 小川晃一, 伊藤公一, “人体透過ファントムと 150 MHz 帯小型アンテナを用いた腹部内局所 SAR の検討,” 信学論 (B), vol.J86-B, no.7, pp.1207-1218, July 2003.

(平成 24 年 1 月 6 日受付, 4 月 23 日再受付)



小川 研 (正員)

平 23 新潟大・工・情報工学卒。現在、同大大学院自然科学研究科博士前期過程在学中。主として MIMO センサに関する研究に従事。



黒崎 雄太

平 21 新潟大・工・情報工学卒。平 23 同大大学院博士前期課程了。現在、パナソニック(株)勤務。在学中は主として無線端末の位置推定に関する研究に従事。



山田 寛喜 (正員)

昭 63 北大・工・電子卒。平 5 同大大学院博士課程了。同年新潟大・工・助手。現在、同大・工・情報・教授。平 12~13 NASA ジェット推進研究所・客員研究員・併任、平 15 ATR 適応コミュニケーション研究所(現 ATR 波動情報工学研究所)・客員研究員・併任、現在に至る。この間、スーパーレゾリューション法を用いた波源の到来方向推定・遅延時間推定、MIMO システム、スマートアンテナ、SAR 画像処理に関する研究に従事、工博。平 3 IEEE AP-S 東京支部 Young Engineer Award, 平 9 本会学術奨励賞, 平 21 本会喜安善市賞, 論文賞, 通信ソ・チュートリアル論文賞, 各賞受賞。IEEE 会員。



山口 芳雄 (正員:フェロー)

昭 51 新潟大・工・電子卒。昭 53 東工大大学院修士課程了。同年新潟大・工・助手。現在、同大・工・情報・教授。トンネル内等損失媒質での電波伝搬、地中・雪中用 FM-CW レーダ、マイクロ波リモートセンシング、ポーラリメトリの研究に従事、工博、平 19 本会チュートリアル論文賞受賞。著書「偏波(ポーラリメトリック)レーダの基礎と応用」,「レーダポーラリメトリの基礎と応用」。IEEE フェロー。