

# LTE 小型基地局用アレーアンテナの開発

岡田 洋 侍\*・持 田 英 史・山 本 剛 史  
濱 田 芳 博・田 中 義 三・杉 本 充 生

Development of Array Antenna Algorithm for LTE Small Base Stations — by Yoji Okada, Eiji Mochida, Tsuyoshi Yamamoto, Yoshihiro Hamada, Yoshizo Tanaka and Mitsuo Sugimoto — Facing the rapid increase in data traffic, mobile operators have become interested in small cellular base stations, such as picocells and femtocells, to improve network capacity. Picocells and femtocells, however, may cause inter-cell interference when operated in the same channel with macrocells. To overcome this problem, we have studied an interference suppression method using an array antenna system for the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Long Term Evolution (LTE) uplink based on Minimum Mean Square Error (MMSE) beamforming. This paper proposes the new method for calculating the MMSE weight in a Resource Block (RB) basis. We have successfully implemented the proposed method on System-on-Chip and verified that the method suppresses interference in real time.

Keywords: array antenna, interference suppression, Long Term Evolution, femtocell, picocell

## 1. 緒 言

現在、移動通信事業者はトラフィックの急激な増加に直面しており、ピコセル・フェムトセルを形成する小型基地局に大きな関心を寄せるようになってきている。しかしながら、無線周波数の逼迫から、これらの小型基地局はマクロセルと同一の周波数で展開される可能性が高く、相互に干渉を引き起こす可能性が指摘されている。そこで当社では、Minimum Mean Square Error (MMSE) アルゴリズムを基にして指向性を形成する Long Term Evolution (LTE) 上り回線用の干渉除去アレーアンテナを開発した。本論文では LTE の Resource Block (RB) 単位で MMSE 重み係数を計算する当社独自の手法を提案する。さらに、同手法が干渉局のリソース割当情報ならびに上位層で用いられるスケジューリング情報を必要としない点で優れていることを述べる。最後に、マルチコア DSP と ARM プロセッサにより構成される System-on-Chip (SoC) への実装を通じ、本手法が最新のソフトウェア無線技術に適していることを示す。

## 2. Long Term Evolution (LTE)

LTE は現行の携帯電話方式の一つである W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) の後継方式として、the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) によって標準化された。アクセス方式として下りは OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)、上りは SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) を使用する。周波数帯域は上

り下りともに最大 20MHz、ピークレートは下り最大 300Mbps、上り最大 75Mbps に達する<sup>(1)~(4)</sup>。

一方で、近年スマートフォンなどの普及により、移動通信事業者はトラフィックの急激な増加に直面している。LTE はこれを解決する方式として期待されているものの、例えば、総務省の統計では月間通算トラフィックは 1 年で倍増しており<sup>(5)</sup>、このペースでトラフィックが増え続ければ 10 年でトラフィックは約 1000 倍に達する。このため、3GPP などの標準化団体でもマクロセル・ピコセル・フェムトセルなどのさまざまな大きさのセルを組み合わせるエリア展開を行うヘテロジニアスネットワーク (HetNet: Heterogeneous Network)<sup>(6)</sup>が議論されている。

ヘテロジニアスネットワークは、マクロセルを形成する大型基地局で広い通信エリアをカバーしつつ、トラフィックニーズの強い地域にピコセルやフェムトセルを形成する小型の基地局を局所的に設置 (オーバーレイ) することに

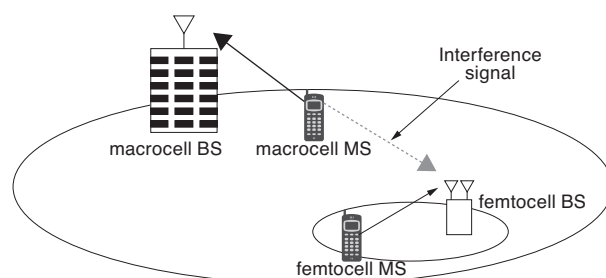


図1 ヘテロジニアスネットワークにおける干渉

よって、マクロセル基地局の負荷を軽減する（トラフィックオフロード）手段として、近年注目を集めている。これによって、システム通信容量を増やすことができる。ただし、マクロセルとピコセル・フェムトセルが同じ周波数を使用した場合には両者間で深刻な干渉が起きるという課題がある。図1はマクロセル基地局に在圏する端末がフェムトセル基地局に対し干渉を与えている様を表している。

### 3. LTE上り回線用干渉除去アレーアンテナ

LTE上り回線用アレーアンテナの構成を図2に示す。

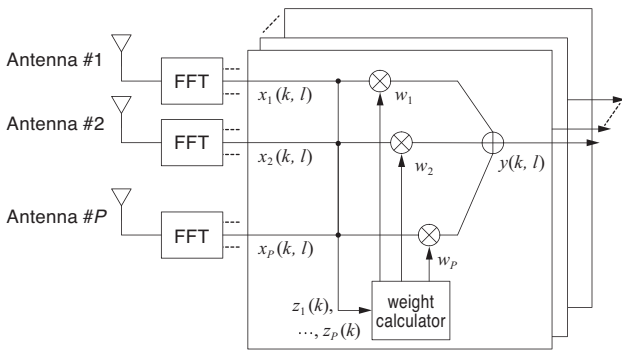


図2 LTE上り回線用アレーアンテナ

端末からの信号はP本のアンテナで受信された後、FFT (Fast Fourier Transform) により、各サブキャリア  $x_p(k, l)$  に分解される。ここで、 $p$ はアンテナ番号、 $k$ はサブキャリア（周波数）番号、 $l$ はOFDMシンボル（時間）番号を表す。さらに、各アンテナ毎に重み係数  $w_p$  を乗算されて、それぞれ  $y(k, l)$  として合成される。

この重み係数  $w_p$  は重み計算部 (weight calculator) により干渉波を除去するように計算される。計算にあたっては、LTEの通信プロトコル上で、その能力が最大に発揮されるように設計した。以下に、設計上の留意点を示す。

**3-1 LTEのフレーム構成** LTE FDD (Frequency Division Duplex) のフレーム構造を図3に示す<sup>(1)</sup>。1frameは10msであり、その中に10個のsubframeがある。さらにsubframeは2slotで構成される。

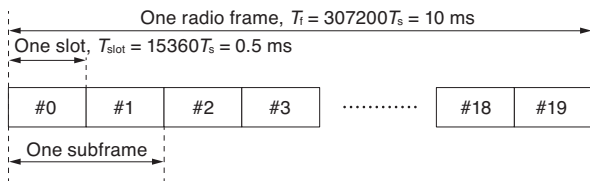


図3 LTE FDD フレーム構造<sup>(1)</sup>

図4にsubframeの構造を示す。  $N_{sc}^{RB}$  (通常は12) 個のサブキャリアと  $N_{sym}^{UL}$  (通常は7) 個のシンボル (周波数軸方向180 [kHz]、時間軸方向0.5 [ms]) で囲まれた領域がResource Block (RB) である。各RBには4シンボル目に参照信号Reference signalが配置されている。さらに、図のようにRBを時間軸方向に2つ並べた領域が、LTE無線フレームにおけるリソース割当の最小単位となる。なお、RBの時間軸方向への並べ方には localized type と distributed type があり、前者は2つのRBを同じサブキャリア周波数上に連続的に並べるのに対し、後者は異なるサブキャリア周波数上に並べる。基地局無線伝送路の状況に合わせて2つの並べ方の適切な方を選択することができる。

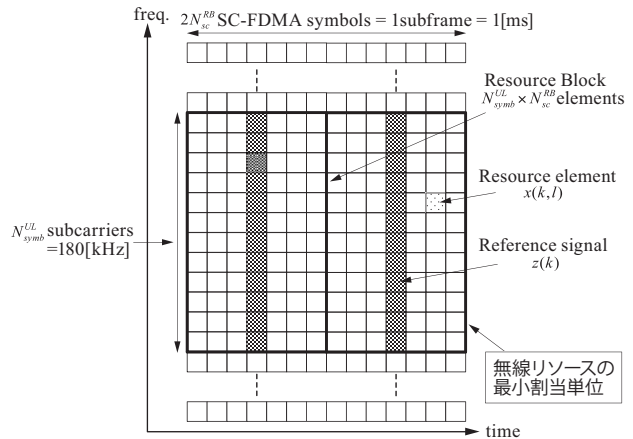


図4 無線リソースの最小割当単位 (localized type)<sup>(1)</sup>

**3-2 アンテナ素子数と周波数割当** 一般にアレー素子数が多いとそれに応じて抑圧可能な干渉波の数も多くなるが、基地局はマクロ・ピコ・フェムトの区別に関わらず、設置場所の制限が大変厳しいため、アンテナ素子数は少ない方が望ましい。例えば、素子数が2の場合は、1個

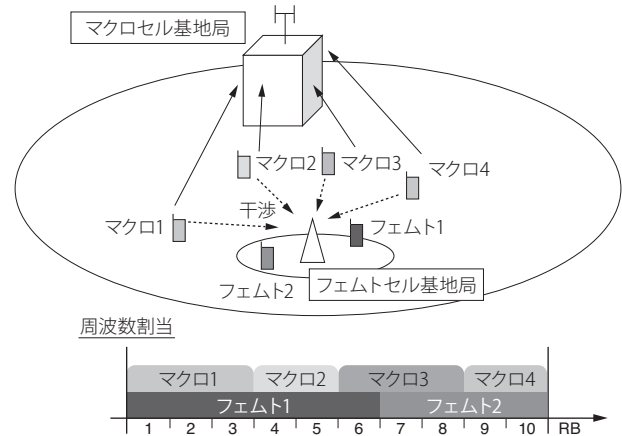


図5 周波数割当とマクロセル端末からの干渉

の干渉波しか抑圧を期待できないため、干渉源が多い場合には、干渉抑圧効果を十分に発揮できない可能性がある。

例として、図5のように、マクロセル基地局と4台の端末、フェムトセル基地局と2台の端末が通信している場合を考える。説明を簡素化するため、周波数軸上にRBが10個あり、各基地局がそれぞれ各端末に対し図5のような割り当てを行うとする。

このとき、フェムトセル基地局が端末1から信号を受信する場合には、異なる方向に存在する3つのマクロセル端末から干渉を受けることになる。通常フェムトセル基地局にはアンテナ素子数が4本以上必要となる。

**3-3 収束速度と時間割当** 一般に、マクロセル基地局はピコセルやフェムトセルなど小型基地局に比較し、端末数が多い上に無線環境の変化も激しい。したがって、図6に示すように、マクロセル基地局は相対的にリソース割り当てを行う周期がフェムトセルより短い、と予想される。つまり、フェムトセル基地局からみれば、干渉源の割当は時間的に激しく変動する可能性が高い。つまり、アレウエイト計算の収束性が重要となる。

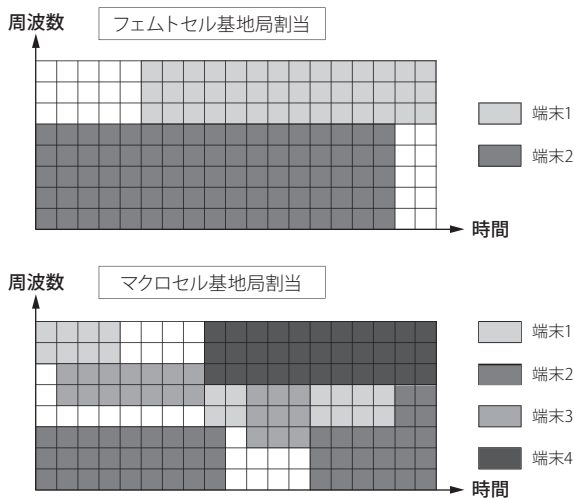


図6 リソース割り当てスケジュールリングの例

表1にアレーアンテナの重み係数計算方式の比較結果を示す。最大比合成 (MRC: Maximum Ratio Combining) 方式は即時に重み係数 (ウェイト) を計算することが可能で、かつ実装が容易であるが、希望信号の信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise power Ratio) を最大にするように重み係数を決定する、つまり、干渉波の影響を考慮しない方式のため、干渉波が存在する場合はチャンネル推定値の精度が劣化しウェイトの精度も大幅に劣化する欠点がある。

一方、最小2乗誤差法 (MMSE: Minimum Mean Square Error) は既知の希望信号と受信信号の2乗誤差を最小化するように重み係数を決める方式である。すなわち、重み係数は干渉波の影響も含めて決めることができる。た

だし、MMSEの解法としてよく知られるLMS (Least Mean Square) やRLS (Recursive Least Square) などの適応アルゴリズムは計算量が少なく、実装が容易である半面、収束までの繰り返し計算回数が必要である。仮に、マクロセル基地局のリソース割り当てが最小割当単位である1ms毎に変化する場合、今回の計算方法としては適していないといえる。

表1 重み係数計算方式の比較

	MRC	MMSE	
		LMS	RLS
収束速度	○	×	△
干渉除去能力	×	○	

#### 4. 当社提案方式概要

3章で述べた課題を解決するため、我々はLTE方式の時間軸・周波数軸の2次元平面のできるだけ小さな範囲でアレウエイトを計算するMMSEアダプティブアレーアンテナを開発した。すなわち、図7に示すように、RBごとにウェイトを計算する方式である。

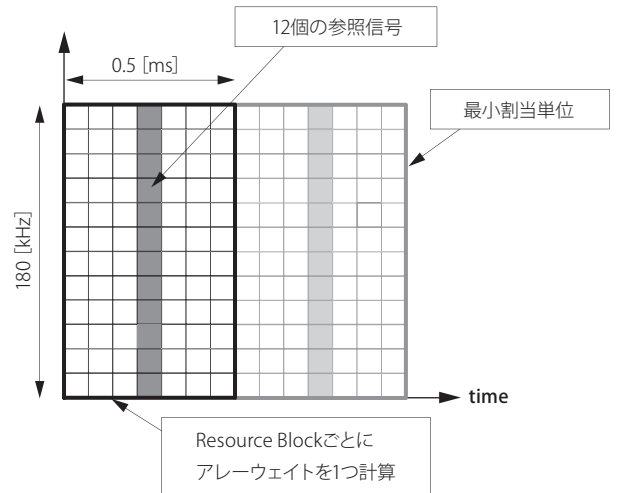


図7 RB単位のアレーウェイト

まず、RBは無線割当の最小単位よりも小さいので、マクロセル基地局のリソース割当とは時間軸・周波数軸ともに無関係にアレウエイトが計算できる。一般に、フェムトセル基地局のエリアはマクロセル基地局に比較して狭いので、接続する端末数が少ない。したがって、フェムトセル基地局では、端末あたりの割当帯域幅が広く、ユーザ割当帯域内に干渉源は複数存在する可能性が高い。一方、図5の場合ユーザ割当を無視して、1-10までの最小割当単位で

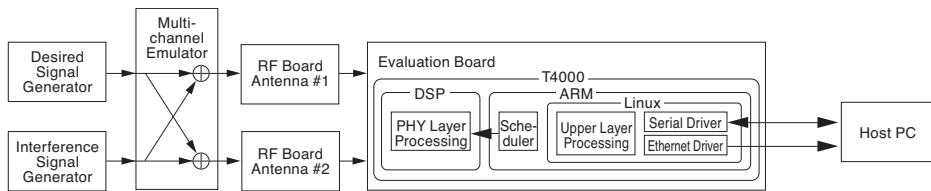


図8 評価環境

見れば、干渉源はそれぞれ1つしかない。そこで、当社では、より少ないアレー素子数で抑圧可能な干渉波の数を増やすため、ユーザ単位の周波数割当帯域よりも小さな周波数単位（RB単位）でアレーアンテナ信号処理を実施する設計とした。

次に、 $P$ 素子で構成されるアレーアンテナの各サブキャリアにおける合成出力信号 $y(k; l)$ は式(1)のようになる。

$$y(k; l) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k, l) \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 $k, l$ はそれぞれRBの周波数・時間インデックス、 $\mathbf{x}(k, l)$ は $(P \times 1)$ の受信信号ベクトル、 $\mathbf{w}$ はアレーウェイトベクタ、 $(\cdot)^H$ はエルミート転置である。

このときMMSEウェイト $\mathbf{w}$ は式(2)で求められる。

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} \quad \text{..... (2)}$$

$\mathbf{R}$ は $(P \times P)$ の相関行列、 $\mathbf{r}$ は $(P \times 1)$ の相関ベクトルである。当社ではRBベースでウェイト計算するため、それぞれ式(3)、(4)で推定した。

$$\tilde{\mathbf{R}} = \sum_{k=0}^{N_{RB}-1} \mathbf{z}(k) \mathbf{z}^H(k) \quad \text{..... (3)}$$

$$\tilde{\mathbf{r}} = \sum_{k=0}^{N_{RB}-1} \mathbf{z}(k) s^*(k) \quad \text{..... (4)}$$

$\mathbf{z}(k)$ はRB中の参照シンボルの $k$ 番目のサブキャリアに対する受信ベクトル（サイズは $P \times 1$ ）、 $s(k)$ は同サブキャリアの送信信号、 $(\cdot)^*$ は複素共役である。

## 5. 評価結果

**5-1 ソフトウェア実装** 4章にて述べた当社アレーアンテナ方式は、米国MindSpeed Technologies Inc.（以下、MindSpeed社）によって開発されたSoC（System-on-Chip）Transcede® 4000上に実装された（Transcedeは米国MindSpeed Technologies Inc.の米国その他の国における商標または登録商標です。）。より具体的には、MindSpeed社が実装したLTE物理層（PHY）ソフトウェアに追加実装することにより、当社方式の実時間動作を確認した。写真1にTranscede® 4000の評価基板の外観、図8に干渉耐性の評価環境を示す。

図9(a)、(b)に実基板上で実時間動作させた最大比合成方式と当社方式のSC-FDMA信号64QAMコンスタレーションを示す。なお、この評価において搬送波電力対干渉品号電力比（CIR: Carrier-to-Interference power Ratio）は3dBとしている。当社方式により性能が改善していることがわかる。

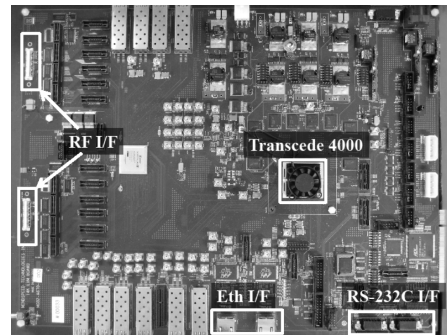
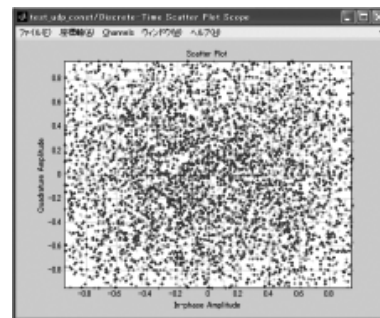
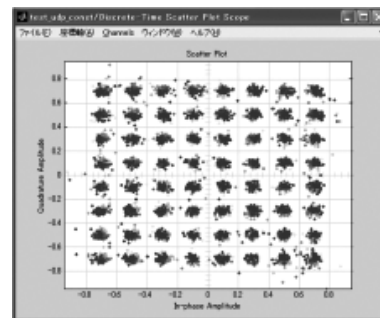


写真1 MindSpeed Transcede® 4000評価基板



(a) 最大比合成 (MRC) 方式



(b) 当社方式

図9 SC-FDMA信号のコンスタレーション



5-2 計算機シミュレーション 提案方式の特性を評価するために、計算機シミュレーションによりシステム評価を行った。表2にシミュレーションの条件を示す。シミュレーションにあたってはアンテナ数2本とし、熱雑音として白色ガウス雑音、伝搬モデルはITU-R M2135のIndoor hotspot model (InH)を使用した。本モデルでは伝搬距離によりマルチパスなどの条件が変わるため、フェムトセル端末はフェムトセル基地局から50mの半径内に、マクロセル端末は150mの半径内にいるものとしている。

帯域幅は10MHz (RB数は50)とし、フェムトセル基地局には端末が1台接続され、全帯域50RBが割り当てられ、マクロセル基地局には端末が2台接続され、それぞれ25RBずつ割り当てられている、と仮定している。

表2 シミュレーション緒元

Number of BS antennas	2
BS antenna element spacing	0.5 wavelength
Carrier frequency	2 [GHz]
System bandwidth	10 [MHz]
Sampling frequency	30.72 [MHz]
CP configuration	Normal CP
Modulation	16QAM
Physical channel	PUSCH
Propagation model	ITU-R M.2135 (InH)
Maximum velocity of MS	3 [km/h]
CNR	20 [dB]
CIR	0 [dB]

端末位置を変えてモンテカルロシミュレーションを行ったときの、アレー出力信号のCINRの累積確率分布を図10に示す。全帯域でアレーアンテナ処理を行った場合とRB

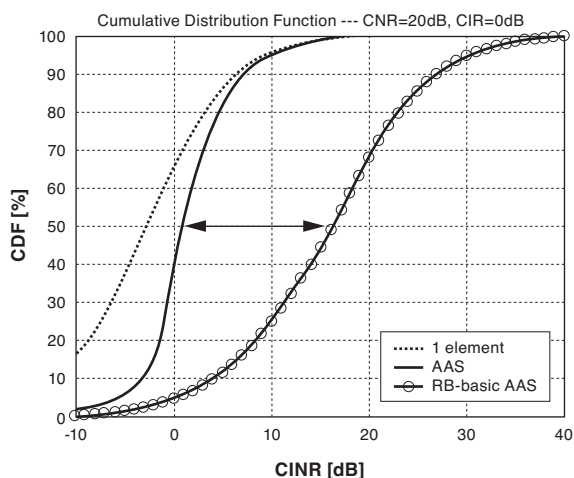


図10 CINR累積確率分布の比較

単位でアレーアンテナ処理を行った場合で、CDF 50%を基準として比較すると、RB単位のMMSEアレーアンテナ処理を行うことにより、半分の端末で15dB程度のCINR改善が得られることがわかる。

## 6. 結 言

本稿では、LTE小型基地局に適した干渉抑圧用アレーアンテナについて検討・実装した結果を示した。

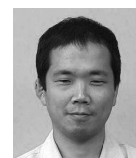
LTE上り回線において、小型基地局に接続した端末からマクロセル基地局に与える干渉を抑圧するために、小型基地局においてマクロセル端末からの干渉を抑圧するアレーアンテナを開発し、実機による実時間動作と計算機シミュレーションにより、その有用性を示した。

## 参 考 文 献

- (1) 3GPP TS36.211 V8.9.0 (2009-12), "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 8)".
- (2) 3GPP TS36.212 V8.8.0 (2009-12), "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 8)".
- (3) 3GPP TS36.213 V8.8.0 (2009-09), "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8)".
- (4) URL <http://www.3gpp.com/LTE>
- (5) URL <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin06.html>
- (6) Sara Landström, Anders Furuskär, Klas Johansson, Laetitia Falconetti and Frederic Kronestedt, "Heterogeneous networks – increasing cellular capacity," ERICSSON REVIEW, 1 2011, pp.4-9.
- (7) 菊間良、"アレーアンテナによる適応信号処理"、科学技術出版(1999)

## 執 筆 者

岡田 洋侍\*: 情報通信研究所 グループ長  
無線通信機器の開発に従事



持田 英史 : 情報通信研究所 博士 (工学)  
山本 剛史 : 情報通信研究所  
濱田 芳博 : 情報通信研究所  
田中 義三 : 情報通信研究所 主査  
杉本 充生 : 情報通信研究所 部長

\*主執筆