

平成 29 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局 電波部 移動通信課 新世代移動通信システム推進室

評価年月：平成 29 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

移動通信システムにおける三次元稠密セル構成及び階層セル構成技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

平成 25 年度～平成 28 年度（4 か年）

・実施主体

民間企業

・総事業費

1, 592 百万円

平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	総 額
569 百万円	376 百万円	317 百万円	330 百万円	1, 592 百万円

・概 要

スマートフォン等の高機能データ通信端末の普及により、近年では年率約 2 倍のペースで移動通信システム全体の通信量が急増しており、これらの増大する通信量を処理するための周波数利用率の向上が喫緊の課題となっている。既に移動通信システムに割り当てられている帯域内での周波数利用率を大幅に向上させるためには、セルを極小化し干渉を回避しつつ稠密に配置することが有効であるが、既存のマクロセル内に膨大な数の極小セルを稠密かつ三次元的に不規則に配置した際、極小セル間の干渉や既存のマクロセルとの間の干渉により周波数利用率は大幅に低下してしまう。そこで、基地局の連携等によってセル間の干渉抑圧を図ることにより、周波数利用率の高い三次元稠密セル構成及び階層化セル構成を確立するため、以下の技術を確立する。

技術の種類	技術の概要
①-1 異なる階層間干渉抑圧技術	マクロセル階層と極小セル階層の異なる階層間で同一周波数を利用する場合における干渉を抑圧させるため、それぞれのセルがネットワーク連携することにより異なる階層間での干渉を抑圧させるための技術。
①-2 同一階層内間の干渉抑圧技術	大都市部においては中高層ビル内の通信トラフィック対策のために、図 1 に示すように極小セルを立体的に配置した三次元空間セル構成が有効であるが、不規則かつ稠密に配置された極小セルにおいては、三次元方向からの干渉を考慮する必要があることから、ネットワーク技術を活用し基地局が連携して干渉を抑圧する技術。
②-1 端末の最適な階層選択技術	端末の移動速度に応じて異なる階層から最適な階層を選択するため、端末の移動速度に比例して変動する伝搬変動などから移動速度を高精度に検出し、最適な階層に割り当てる技術。
②-2 階層間ハンドオーバー制御技術	極小セル化を行うと、図 2 に示すように高速走行する移動局が短時間で複数のセルを移動することから、スムーズなハンドオーバーが困難となることから、携帯電話サービスの連続性を維持するために必要となるマクロセル層と極小セル層の階層間ハンドオーバーについて、移動速度に応じて極小セルへハンドオーバーさせずにマクロセル階層で通信を継続させるよう制御する技術。
③ ネットワーク連携制御技術	<ul style="list-style-type: none">一定範囲内の基地局を一つのグループにまとめたクラスタにより構成される複数の無線送信装置を、基地局装置により制御を行うことで、ネットワーク連携制御を実現する技術。基地局が密に設置されている都市部においてはクラスタ境界が数多く存在することから、動的にクラスタ構成を変更することによりネットワーク連携制御を実現する技術。

④階層化・稠密セル構成に対応した電波伝搬推定技術	階層化・稠密セル構成においては、マクロセルと極小セルの設置状況に応じて様々な組み合わせでの同一周波数干渉の推定が必要になることから、伝搬損失特性、伝搬遅延時間(時間)特性、電波到来角(空間)特性を同時に推定できる電波伝搬推定技術。
--------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

・研究開発概要図

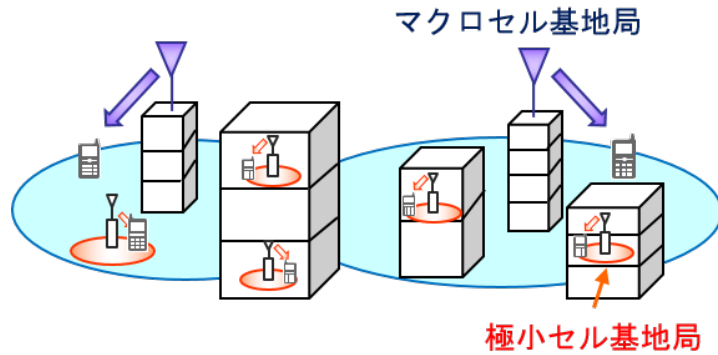


図1 三次元空間セル構成

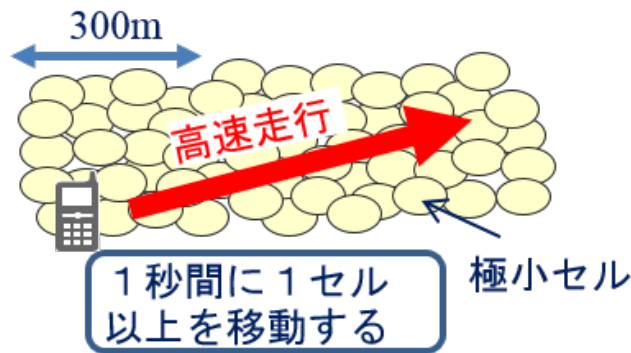


図2 極小セル構成の限界

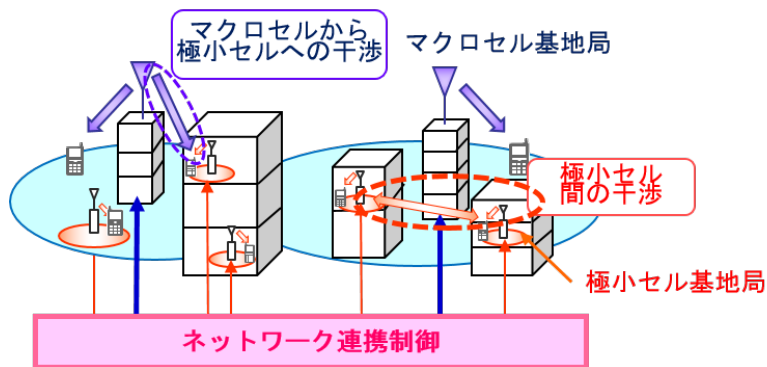


図3 ネットワーク連携干渉抑圧技術

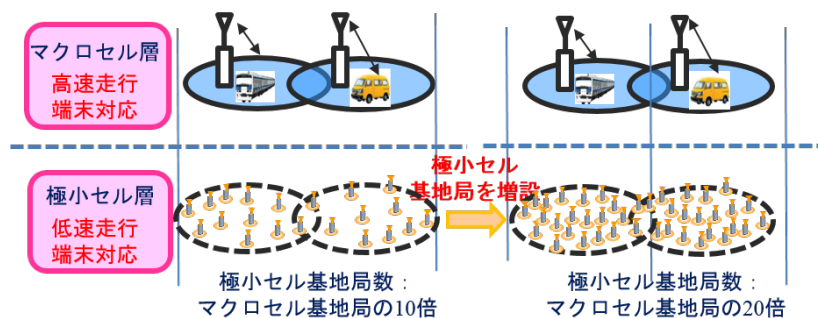


図 4 階層化・稠密セル構成

・スケジュール

各年度の成果又は実施内容を簡潔に記載すること。

技術の種類	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度
①階層間・階層内の干渉抑圧技術 (①-1 及び①-2)	・NW 連携干渉実験システム構築	・基地局干渉抑圧機能開発	・試作装置開発・室内実験	・システム総合評価 ・フィールド実験
②階層間モビリティ制御技術 (②-1 及び②-2)	・NW 連携干渉実験システム構築	・極小セル基地局・移動局モビリティ制御機能開発	・移動局走行速度推定技術開発 ・階層間ハンドオーバー技術開発	・システム総合評価 ・フィールド実験
③ネットワーク連携制御技術	・NW 連携干渉実験システム構築	・極小セル基地局・移動局ネットワーク制御機能開発	・高精度時刻同期技術開発 ・階層化セル制御技術開発	・システム総合評価 ・フィールド実験
④電波伝搬推定技術	・電界強度測定環境構築	・階層化・稠密セル電波伝搬測定 ・レイトレース電波伝搬推定法開発	・三次元時空間電波伝搬特性推定法開発	・電波伝搬シミュレータ開発

(2) 達成目標

既存のマクロセルエリア内に膨大な数の極小セルを稠密かつ三次元的に不規則に配置した際、極小セル間の干渉や既存のマクロセルとの間の干渉により周波数利用率は大幅に低下する。このような環境下においては、各セルが独立かつ自律的に干渉を抑圧する手法では限界があることから、①異なる階層間の干渉抑圧技術、②同一階層内間の干渉抑圧技術、③端末の最適な階層選択技術、④階層間ハンドオーバー制御技術、⑤ネットワーク連携制御技術、⑥階層化・稠密セル構成に対応した電波伝搬推定技術を確立することにより、ネットワーク技術を活用し基地局が連携して干渉を抑圧するように制御を行う周波数利用率の高い三次元稠密セル構成及び階層セル構成技術を平成 28 年度までに確立し、高密度に極小セルが配置された環境下において周波数利用率を 3 倍以上に改善することにより、周波数の有効利用の一層の向上に資する。

○ 関連する主要な政策

V. 情報通信 (ICT 施策) 政策 13 「電波利用料財源による電波監視等の実施」

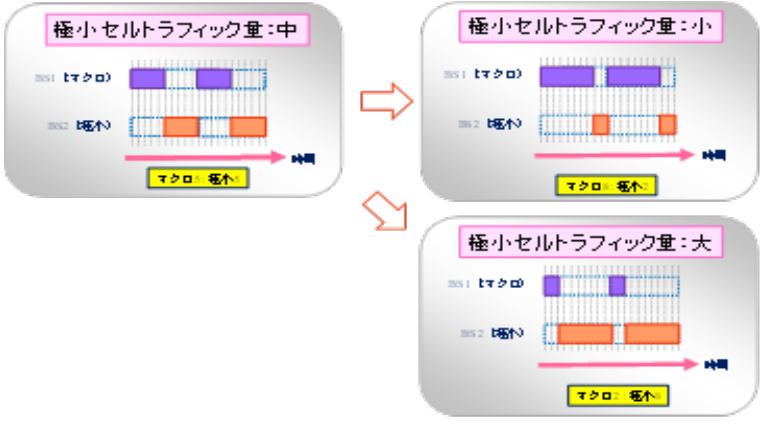
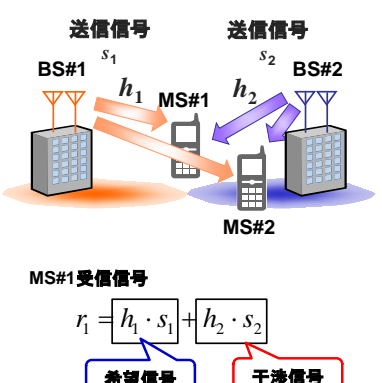
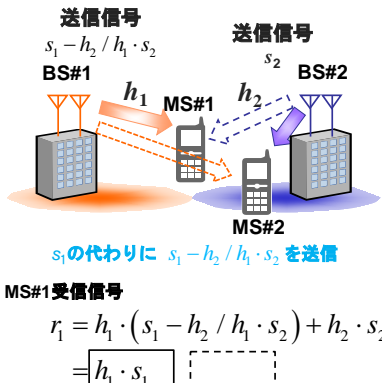
○ 政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

名称 (年月日)	記載内容 (抜粋)
世界最先端 IT 国家創造宣言 (平成 25 年 6 月 14 日 閣議決定)	「IV. 利活用の裾野拡大を推進するための基盤の強化 4. 研究開発の推進・研究開発成果との連携」において「世界最高水準の IT 社会を実現し、維持・発展させるために、情報通信社会の今後の動向を見据えた研究開発を推進する」旨の記載あり。

(3) 目標の達成状況

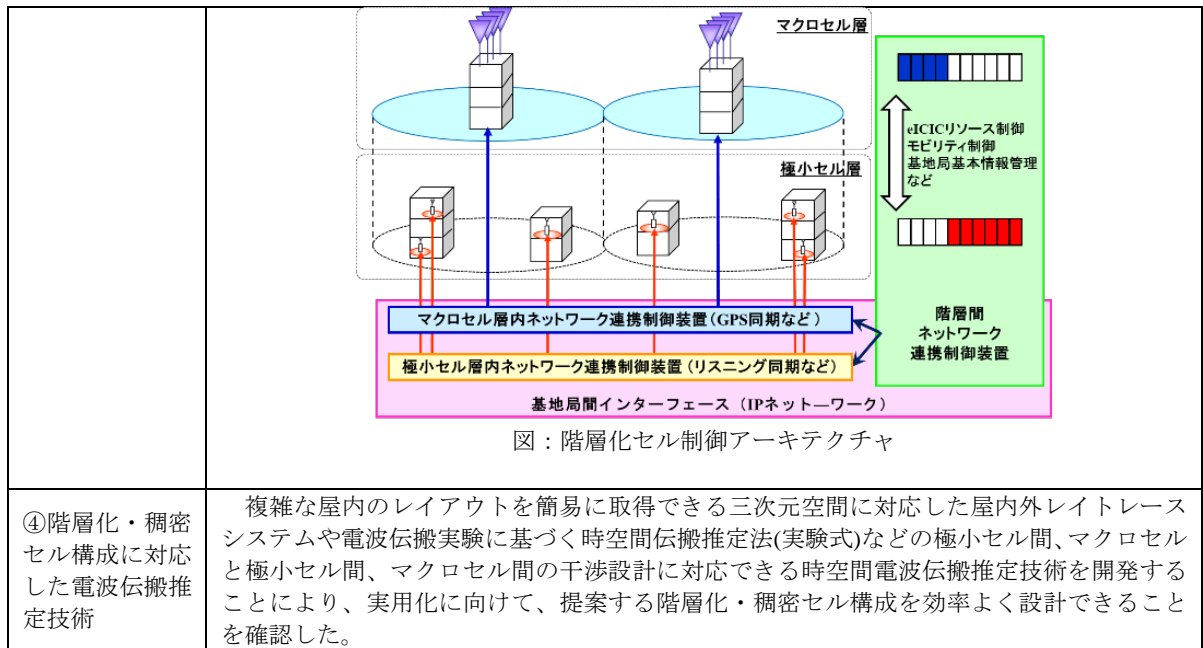
本研究開発においては、移動通信システムにおける三次元空間セル構成において、以下の技術を確立し、組み合わせることにより、周波数利用効率の高い三次元稠密セル構成及び階層セル構成技術を確立した。これにより、高密度に極小セルが配置された環境下における周波数利用率を 3 倍以

上に改善することを実現し、周波数の有効利用の一層の向上に寄与した。このことから、所期の目標を達成したといえる。

技術の種類	目標の達成状況
<p>①-1 異なる階層間干渉抑圧技術</p>	<p>階層化・稠密セル構成において、マクロセル層と極小セル層の異なる階層間のセル間干渉抑圧技術として、各階層がネットワーク連携して異なる時間のリソースを割り当てる方式を拡張し、トラフィックの時間変動に応じて最適な無線リソースを割り当てる方式を確立した。(下図)</p> <p>また、マクロセル基地局、極小セル基地局間の時刻同期を高精度に確立するため、マクロセル基地局の無線信号を利用して極小セル基地局で高精度に時刻同期を確立する技術(リスニング同期技術)の検討を行い、0.5μs以下の精度で高精度に同期を確立できる手法を確立した。</p>  <p>図：トラフィックに応じた最適な無線リソース割当</p>
<p>①-2 同一階層内間の干渉抑圧技術</p>	<p>同一階層内の干渉抑圧技術として、新たな隣接基地局間協調マルチユーザ MIMO (協調 MU-MIMO) 技術について検討を行い、基地局間での伝搬チャネル情報の共有が不要である簡易な送信ウェイト生成方式「送信干渉キャンセル法」を提案・確立した。同手法を用いることにより、従来法による端末(下図の(MS)#1)における基地局(下図の(BS)#2)からの干渉によるスループットの劣化を改善できることを確認した。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="475 1279 938 1839"> <p>送信干渉キャンセル法を適用しない場合</p>  <p>MS#1受信信号</p> $r_1 = h_1 \cdot s_1 + h_2 \cdot s_2$ <p>希望信号 (blue box) 干渉信号 (red box)</p> <p>干渉によりスループットが大きく低下</p> <p>(a) 従来法</p> </div> <div data-bbox="963 1279 1406 1839"> <p>送信干渉キャンセル法を適用する場合</p>  <p>MS#1受信信号</p> $r_1 = h_1 \cdot (s_1 - h_2 / h_1 \cdot s_2) + h_2 \cdot s_2$ $= h_1 \cdot s_1$ <p>希望信号 (blue box) 干渉信号が消える (red box)</p> <p>上記処理を各MSに対して実施することで干渉を抑圧しスループットを改善</p> <p>(b) 提案法</p> </div> </div> <p>図：提案法の基本概念</p>
<p>②-1 端末の最適な階層選択技術</p>	<p>本研究開発で提案する階層化・稠密セル構成における階層間モビリティ制御(端末の移動等)に応じた最適な無線リソースの割当て)を実現するために必須となる端末走行速度推定技術を確立した。特に、GPS機能が手動で無効化されている場合に有効な手段として、無</p>

	<p>線伝送部の受信側で測定した伝搬変動から検出したドップラー周波数¹により速度を推定する技術について、実伝搬環境における周辺移動散乱体（対向車等）による走行速度推定精度の劣化を改善するアルゴリズムを開発し、推定精度の改善を実伝搬データに基づき検証した。</p> <p>図：端末走行速度推定値の累積分布関数(CDF)</p>
<p>②-2 階層間ハンドオーバー制御技術</p>	<p>端末の走行速度を基地局で推定し、速度に応じて接続する階層（マクロセル層、極小セル層）を選択する階層間ハンドオーバー制御技術を提案・確立した。端末の走行速度を、端末で取得した GPS 位置情報のフィードバックや、技術②-1 に示すような無線信号から得られるドップラー周波数から推定し、極小セル在圏時に端末の走行速度が所定のしきい値を超えた場合、マクロセル層に優先接続させることで、高速走行に伴う頻繁なハンドオーバーの発生を回避する手法により、通信品質が改善されることを確認した。</p> <p>図：走行速度ベースハンドオーバー</p>
<p>③ネットワーク連携制御技術</p>	<p>三次元・稠密セル構成において、ネットワーク連携時の膨大な制御処理を低減させるために、マクロセル層と極小セル層に分割して制御を行う階層化セル制御アーキテクチャを確立した。（下図）</p> <p>このアーキテクチャの実現のため、階層内の連携制御を行う階層内ネットワーク連携制御装置と、階層間の連携制御を行う階層間ネットワーク連携制御装置を開発し、これらの装置に基地局間の同期を実現する高精度同期制御機能、マクロセル層と極小セル層で使用するリソースの割合を制御する階層間リソース制御機能、階層間ハンドオーバーにおけるハンドオーバー閾値を制御する階層間モビリティ制御機能を実装した。また、これらのネットワーク連携制御装置を用いて実証試験を行い、各ネットワーク連携制御装置からの指示で、基地局間同期、階層間リソース制御、階層間ハンドオーバー制御が正常に動作することを確認した。</p> <p>また、1 台の集中基地局から多数の極小セルを制御するため、一本の光ファイバに数十アンテナ分の信号を高密度に多重化する（従来方式だと一本の光ファイバに1～2アンテナ分の多重化が主流）ことで、光ファイバの芯線数を削減する低コストな光張り出し方式を開発した。</p>

¹ 電波の発生源と観測者との間の相対速度により、実際に発生した周波数と異なって観測される周波数のこと。



④階層化・稠密セル構成に対応した電波伝搬推定技術

複雑な屋内のレイアウトを簡易に取得できる三次元空間に対応した屋内外レイトレースシステムや電波伝搬実験に基づく時空間伝搬推定法(実験式)などの極小セル間、マクロセルと極小セル間、マクロセル間の干渉設計に対応できる時空間電波伝搬推定技術を開発することにより、実用化に向けて、提案する階層化・稠密セル構成を効率よく設計できることを確認した。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(平成 29 年 6 月 19 日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計 28 件の論文発表及び合計 109 件の口頭発表に加え、合計 30 件の三次元稠密セル構成及び階層セル構成における干渉抑圧方法、ハンドオーバー制御方法、基地局間の時間同期方法、ドップラースペクトルを用いた端末速度推定方法等に係る特許出願(うち特許取得 10 件)など、非常に多くの成果を挙げている。また、国際電気通信連合 無線通信連合 (ITU-R) において三次元空間セル構成に対応できるような電波伝搬モデルを提案するなど活発に標準化活動にも貢献し、その提案内容のうちいくつかが勧告化された。以上より、本研究開発は特筆すべき成果を数多く上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	1件(0件)	1件(0件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	4件(4件)	8件(8件)	8件(8件)	7件(7件)	27件(27件)
その他の誌上発表数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
口頭発表数	24件(0件)	34件(0件)	31件(0件)	20件(2件)	109件(2件)
特許出願数	3件(0件)	5件(0件)	15件(0件)	7件(0件)	30件(0件)
特許取得数	0件(0件)	0件(0件)	4件(0件)	6件(0件)	10件(0件)
国際標準提案数	1件(1件)	0件(0件)	1件(1件)	1件(1件)	3件(3件)
国際標準獲得数	1件(1件)	0件(0件)	1件(1件)	1件(1件)	2件(2件)
受賞数	1件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	1件(0件)	2件(0件)
報道発表数	2件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	2件(0件)
報道掲載数	2件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	2件(0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上发表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFCなど、Conference、Workshop、Symposium等でのproceedingsに掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上发表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>スマートフォン等の高機能データ通信端末の普及により、近年では年率約2倍のペースで移動通信システム全体の通信量が急増しており、これらの増大する通信量を処理するための周波数利用率の向上が喫緊の課題となっている。既に移動通信システムに割り当てられている帯域内での周波数利用率を大幅に向上させるためには、セルを極小化し干渉を回避しつつ稠密に配置することが有効であるが、既存のマクロセル内に膨大な数の極小セルを稠密かつ三次元的に不規則に配置した際、極小セル間の干渉や既存のマクロセルとの間の干渉により周波数利用率は大幅に低下してしまう。</p> <p>本研究開発は、周波数利用効率の高い三次元稠密セル構成及び階層化セル構成技術を確認し、高密度に極小セルが配置された環境下における周波数利用率を従来と比較して3倍以上に改善することにより係る問題の解決に寄与するものであり、よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>研究開発の実施体制については、移動通信システムについて実際にサービス提供を行っている実施主体により、技術課題の選定及び目標設定のもと実用化を見据えて適切に研究開発が実施されている。また、研究開発の実施期間中も、無線システム、電波伝搬、携帯電話事業等の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。</p> <p>経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発の実施により、高精度な基地局間同期技術、ネットワーク連携制御技術、マクロセルと極小セル間のハンドオーバー制御技術などの要素技術を開発することにより、基地局が連携して干渉を抑圧するように制御を行う周波数利用効率の高い三次元稠密セル構成及び階層化セル構成技術を確認し、高密度に極小セルが配置された環境下において周波数利用率が3倍以上に改善されることをシミュレーションや実証実験を通じて確認することより、移動通信システムによる膨大な通信量を処理する効率的なセル構成の実用化に寄与した。よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発による周波数利用効率の高い三次元稠密セル構成及び階層化セル構成技術については、周波数の効率的な利用を一層向上させるとともに、移動通信システムの通信量の増大を支えることにより、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。</p> <p>また、支出先の選定に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定をしている。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>スマートフォンの普及や通信内容のリッチコンテンツ化等による移動通信システムのトラフィック増大は近年も続いており、今後、IoTの普及などによりますますその傾向が顕著になることが予想されることから、携帯電話など国民の生活に欠かせない基盤技術となった移動通信システムの周波数利用</p>

効率の向上については、喫緊に具体的な解決方策を検討すべき課題である。

加えて、「新たな情報通信技術戦略」（平成 22 年 5 月 IT 総合戦略本部決定）及びその工程表において、我が国が強みを有する技術分野として次世代ワイヤレス等の研究開発を推進していくとされており、また「新成長戦略」においても「ホワイトスペースなど新たな電波の有効利用」等により、「情報通信技術の徹底的な利活用による新市場の創出（約 70 兆円の関連新市場の創出を目指す）」とされていることから、移動体通信における高度な周波数有効利用技術を確立する本研究開発は、優先的に実施していく必要がある。

よって、本研究開発には、優先性があつたと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、スマートフォン等の高機能データ通信端末の普及により増大する通信量への対策として、セルを極小化し干渉を回避しつつ三次元的かつ稠密に配置しつつも、周波数利用効率の高い三次元稠密セル構成及び階層化セル構成を確立するために実施したものである。

本研究開発において、高精度な基地局間同期技術、ネットワーク連携制御技術等を確立することで、高密度に極小セルが配置された環境下において基地局が連携して干渉を抑圧するように制御を行うことが可能となり、これにより周波数利用率が 3 倍以上に改善されたことから、目標を達成することができた。

また、実用化に向けてシミュレーションや試作装置による実証実験を行うことにより、実環境における動作確認や目標の達成状況を確認している。また、論文・口頭発表、特許出願や国際標準化に向けた活動なども着実に実施されるなど本研究開発の有効性、効率性等が認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

本研究開発で確立した技術については、増大する無線トラフィックを収容するための効率的なセル構成を実現するために、周波数利用率を向上させる技術であることから、今後、本成果が十分活用されるように、その有効性を学術論文や国際会議等における口頭発表等を通じて広く啓蒙する。また、本研究開発を受けた応用開発として、LTE/LTE-Advanced 標準システムへの実装、機能検証を実施など、将来的に本研究開発成果が早期に実用化され、通信オペレータにより三次元空間セル構成が実際に広く適用されるよう取組を推進する。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（平成 29 年 6 月 19 日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・事前に設定した達成目標については、ほぼ全ての技術項目について目標を達成していると判断できる。また、シミュレーションと実環境での走行試験の両面から目標に対する達成度を評価していることから、信頼できる成果が得られている。
- ・得られた成果から、予算は効率的に使用され、体制も十分であったと判断できる。
- ・対外発表や特許の取得も活発であり、成果が認められる。国際標準化活動も活発に行っており、ITU-R で研究成果の一部が標準化されている点は高く評価できる。
- ・現在の基地局ネットワークをベースにした検討であり、実用性は十分あると考えられ、商用サービスに向けて重要な技術基盤を確立したと判断できる。
- ・本研究開発により、周波数利用効率（スループット）が 3 倍以上に改善されることが検証されており、電波資源拡大のために有益であったと判断できる。

7 評価に使用した資料等

○世界最先端 IT 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 29 年 5 月 30 日閣議決定）
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/siryoul.pdf>

○電波政策 2020 懇談会 報告書（平成 28 年 7 月 総務省）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf

- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

- 周波数再編アクションプラン（平成28年11月改定版）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000449260.pdf