

推薦論文

密な基地局群の無線相互干渉調停のための 空間分割スケジューリング技術

山口 弘純^{1,a)} 廣森 聡仁¹ 東野 輝夫¹ 梅原 茂樹² 浦山 博史² 山田 雅也² 前野 誉³
金田 茂^{1,3} 高井 峰生^{1,4}

受付日 2013年5月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: 本稿では, 無線基地局が密に設置され, 将来的に追加設置されていくような地理空間環境において, 無線資源の高い利用効率と, 資源管理の容易性をともに達成する空間再利用型時分割多重アクセス (STDMA) スケジューリング技術を提案する. 提案手法では, 地理座標に対して規則的であり, かつ必要資源数なるべく少ない資源割当てを実現する Vector Cover アルゴリズム (VC アルゴリズム) を開発し, 網羅的シミュレーション実験により提案手法の有効性を評価している. また, 高度交通システム向け帯域を時分割利用する路側機の配置設計事例に応用し, 実環境での有用性を検証している.

キーワード: 空間分割スケジューリング, 無線干渉, 基地局設置

STDMA Scheduling for Densely-deployed Wireless Base Stations

HIROZUMI YAMAGUCHI^{1,a)} AKIHITO HIROMORI¹ TERUO HIGASHINO¹ SHIGEKI UMEHARA²
HIROFUMI URAYAMA² MASAYA YAMADA² TAKA MAENO³ SHIGERU KANEDA^{1,3} MINEO TAKAI^{1,4}

Received: May 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: This paper presents an algorithm for resource allocation to base stations that compete with each other for limited bandwidth. The area of interest is spatially divided into cells so as to equalize radio interference patterns. Based on this property, an optimal resource allocation with repeated patterns is found in an efficient way. The method is justified by several proofs followed by several experimental results.

Keywords: SDMA scheduling, wireless interference, station deployment

1. はじめに

スマートフォンの爆発的普及により, ポータブルデバイスからの WiFi アクセスも急増している. 近年は 3G 通信網のオフローディングの有力な手段として注目を集めて

おり, 都市の至るところに WiFi アクセスポイントが設置されつつある. 車両交通網では, 路肩に設置される基地局 (ITS 路側機) と車両 (車載通信機) 間の無線通信 (路車間通信) が実用段階に入っており, 交差点における右左折時の衝突防止のために ITS 路側機から車両へ交差点周辺の歩行者および車両の存在を通知できるよう, 交差点ごとに ITS 路側機を設置することなどが検討されている [1].

無線 LAN 通信は (いわゆる広域網と比較して) 無線通信距離がたかだか数百 m 程度と比較的短いため, 無線 LAN 基地局を面的に配置することで移動ユーザに対するカバ

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 住友電気工業株式会社
Sumitomo Electric Industries, LTD., Osaka 554-0024, Japan

³ スペースタイムエンジニアリング
Space-Time Engineering, LLC, Rolling Hills Estates,
CA90274, USA

⁴ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA96095,
USA

a) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

本論文の内容は 2012 年 10 月のマルチメディア通信と分散処理ワークショップにて報告され, マルチメディア通信と分散処理研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

レージ率やユーザ収容数を向上させる。同様に、路側機はたとえば半径が数百 m 程度のスポットに関する情報（たとえば前述のような各交差点固有の情報）をそのスポットを通過する車両のみに配信するため、スポットごとに基地局を路側に設置する。しかしそのように面的に多数配置された短距離無線通信機（以下、単に基地局とよぶ）が互いに同じ周波数帯を用いる場合、基地局間の無線通信干渉が課題となる。

無線通信では受信電波の品質を表す SIR (Signal-to-Interference Ratio) あるいは, DUR (Desired signal-to-Undesired signal Ration) が一定の閾値を満たす必要があるが, 非希望波は希望波より少ない電力でも希望波に干渉を与えるため, 干渉距離は通信距離よりも大きい場合が多い。たとえば 6 章で述べる道路情報配信サービス用の路側機では, 通信サービスを提供したい距離を路側機から半径 240 m, 受信可能な SIR 下限を約 20 dB, 電波伝搬損失モデルとして 760 MHz 帯における ITU-R P.1411-1 勧告 [2] (ビル街など屋外都市環境における電波伝搬損失モデル) を利用し, 図 6(a) の大阪市中央部の主要道路交差点ごと (約 400 m 間隔) に設置することを考えた場合, おおよそ周辺 2 つから 3 つ程度の交差点に干渉を与えることが分かっている。

セルラ網では類似の問題が古くから知られており, 非干渉セル間でアクセス時間や周波数帯を共有する空間再利用型の多重接続により相互干渉解消を図る方法などが提案されている。しかし既存手法のほとんどは, 多数の基地局どうしの相互干渉が複雑に発生するような面的かつ高密度な展開は想定していない。また無線ネットワークではすべての干渉関係が得られると仮定し, それらを干渉グラフなどで表現し, 最小彩色問題のアルゴリズムなどを用いて空間再利用時分割・周波数分割スケジューリングを決定する方法も多く研究されてきているが, 複数のプロバイダや個人が個別に基地局を設置する場合などでは相互干渉関係の正確な情報は得られないことが多い。さらに同様の理由から基地局間の協調も期待できず, 自律分散調停アルゴリズムの適用も現実的ではない。

本稿では, 無線基地局が密に設置され, 将来において追加的に設置されていくような地理空間環境において, 資源割当て管理が容易で, 高い資源利用効率を達成する空間分割スケジューリング技術を提案する。提案手法では, 地理空間を等サイズの矩形セルに分割し, 基地局のおおよその最大干渉距離の見積りをもとに, 基地局の存在およびその位置にかかわらずセル間の (潜在的な) 干渉を決定する。そのように規則化された空間において, 同様のセル間干渉パターンが規則的に繰り返し出現する状況において (一定の条件を満たす場合に) ほぼ最適でかつ規則的な資源割当てを実現するアルゴリズムを開発している。これにより, 各セルの基地局が利用可能な資源が, その設置座標から一

意に決定できるという利点がある。

網羅的なシミュレーション実験により, (1) 資源割当ての規則性 (管理の容易性), (2) 必要資源数の最適性, の 2 点から提案手法の有効性を評価している。また, STE 社のネットワークシミュレータ Scenargie [3] を用い, 大阪市中央区の区画を対象に, 高度交通システム向け帯域を路側機間で時分割利用する設計事例に応用し, 有用性を検証した結果を述べる。

2. 関連研究

セルラ網ではセル間の干渉を回避し通信品質を向上させる技術が多く研究されている。たとえば GSM ネットワーク向けには Fractional Frequency Reuse (FFR) とよばれる技術があり, セル境界付近のユーザには異なる周波数を割り当てることで基地局遠方のユーザの被干渉を軽減する [4]。また, 基地局をクラスタ化して空間利用効率を向上させるネットワーク協調技術などが提案されている [5], [6]。これらの技術はセルラ網設備に依存した技術であり, 汎用の無線ネットワークを対象としたものではない。これに対し, 文献 [7] では自律分散型の無線ネットワークにおいて様々な時間, 周波数, 領域空間に対する必要資源数やネットワーク性能の解析が行われている。また, 文献 [8] ではチャネル特性に基づき必要資源数と送信電力を自律分散的に調整する技術が提案されている。

無線ネットワークにおける TDMA スケジューリング技術は従来より多数提案されてきている [9], [10], [11]。文献 [12] では無線マルチホップネットワーク向け TDMA スケジューリング技術が提案されており, 文献 [13] では干渉関係を完全に把握することで, 空間再利用時分割スケジューリング (Spatial Reuse TDMA (STDMA)) の効率が向上することを示している。文献 [14] では, 無線メッシュネットワークにおける STDMA スケジューリングを多項式時間で求めるアルゴリズムを提案している。STDMA スケジューリングは地理的に離れた互いに干渉しない地域で周波数の再利用を行う技術であり, 提案手法もこのカテゴリに属する。これらの既存手法は密で複雑な干渉関係に対する解法を与えていない点で提案手法とは目的が異なる。なお, セルラ網の資源割当ても本質的には同質の問題であるが, 距離に基づく単純な干渉のみを想定しているケースがほとんどである。

近年, 整列した無線ノードを想定したベクトルモデルによる被覆アルゴリズムが提案されている [15]。このアルゴリズムは, 本稿で提案する VC アルゴリズムと類似したものであるが, 理想的なノード整列環境を想定したもので, 適応先が限定的である。一方, 提案するアルゴリズムは, 任意の干渉形状を対象とし, かつアルゴリズムの正当性を示しており, より実用的なアルゴリズムとなっている。また, 多数の基地局に対し, 一括して資源割当てを導出する

だけでなく、新たな基地局を加える際に、すでに資源割当てされた基地局になるべく影響を与えないよう、資源割当てを導出する手法を提案しており、基地局の運用を考慮した点でも既存研究とは大きく異なる。

3. 問題設定と資源割当て例

3.1 資源割当て問題

対象領域の座標空間を P 、基地局の集合を S 、 S の座標を $\mathcal{E}: S \rightarrow P$ で表す。 P はたとえば路側機設置など全国区で統一した資源割当て規則を利用するような場合は地図座標空間全体とすることが考えられる。また $\mathcal{I}: S \rightarrow \mathcal{P}(S)$ で、基地局 $s \in S$ がある一定の出力で通信を行った場合に干渉を及ぼす基地局の集合 $\mathcal{I}(s)$ を与えるものとする (\mathcal{P} は冪集合を表す)。

一般の資源割当て問題は、 S 、 \mathcal{E} および \mathcal{I} が既知の場合に、時分割スロット集合などの資源の離散集合 R に対し、 $\forall s \in S \forall s' \in \mathcal{I}(s) \mathcal{A}(s) \neq \mathcal{A}(s')$ であり、かつその値域が最小 (すなわち必要資源数が最小) であるような S への R の割当て $\mathcal{A}: S \rightarrow R$ を発見する問題として定式化されることが多い。しかし前述のように基地局が密に設置されている場合は干渉関係 \mathcal{I} が非常に複雑となり、その情報を収集するコストや将来の基地局追加変更などに対する再設定の手間を考慮した場合には得策でない。そこで本稿では、そのような情報を利用する代わりに、領域をセル分割し、それらのセルに基地局がある程度密に配置された場合に生じるであろう干渉関係の見積り (潜在的に生じる干渉関係) に基づき、セル位置から一意に割当て資源を決定できるような規則的割当てのアルゴリズムを提案する。基地局は自身の設置座標からセル位置を特定することで利用可能な資源を容易に決定できるメリットがある。また、その規則性のもとで資源利用効率の良い割当てを実現している。

空間再利用に規則性のある割当ては車両のような移動体通信のメディアアクセス制御を行う場合にも有効である。車両は GPS による位置を用い、それから一意に決定されるチャンネルを利用することで、他車両とのネゴシエーションを必要とすることなく地理に応じた時分割メディアアクセス制御を実現できる。

提案手法では、領域 P をいわゆるメッシュ状に分割して等サイズのセル集合 C を得る。このもとで、セル内に基地局が実際に存在するか否か、また何機が存在するかにかかわらず、どの地点に基地局が存在したとしても、それらの干渉関係を包含するようなセル間干渉関係 $\mathcal{I}_c: C \rightarrow \mathcal{P}(C)$ に置き換える。これにはある与干渉モデルを想定したうえで見積りを行う。たとえば2地点 p, p' 間のユークリッド距離 $d(p, p')$ が一定値 L 以下かどうかで干渉関係の有無を決定するような単純な与干渉モデルでの見積りを行う場合は、

$$\begin{aligned} \forall p, p' \in P \quad d(p, p') \leq L \\ \Rightarrow \mathcal{C}(p') \in \mathcal{I}_c(\mathcal{C}(p)) \wedge \mathcal{C}(p) \in \mathcal{I}_c(\mathcal{C}(p')) \end{aligned} \quad (1)$$

なる干渉関係 \mathcal{I}_c を用いればよい (ただし、 $\mathcal{C}(p)$ で地点 p を含むセルを表す)。また、たとえば前述の ITU-R P.1411-1 勧告 [2] に基づく電波伝搬損失モデルなど、東西南北方向の道路に沿って干渉が生じやすい場合には、たとえばセル間の予想最大干渉距離を L_C とし、 $\bar{d}_c(c, c')$ をセル c と c' が水平または垂直な位置関係の場合のみ2セル間の距離を、そうでなければ ∞ を返す関数とすると、

$$\begin{aligned} \forall c, c' \in C \quad \bar{d}_c(c, c') \leq L_C \\ \Rightarrow c \in \mathcal{I}_c(c') \wedge c' \in \mathcal{I}_c(c) \end{aligned} \quad (2)$$

なる干渉関係 \mathcal{I}_c を用いることなどが考えられる。様々な干渉モデルについては文献 [16] などを参照されたい。

提案手法ではセル間干渉を、あるモデルに基づきセル内にあるすべての地点間の干渉関係を考慮して決定することから、あるセルから周辺セルに与える干渉パターンはいずれのセルにおいても同一となる。これにより実際には基地局が設置されず干渉が生じない地点も干渉が存在するものとして扱われてしまう場合もあるが、本稿ではそれらの資源は将来的に必要とされる、あるいは他の多くの地点ではそのパターンでの干渉が生じていると仮定する。この性質を最大限に活用し、 \mathcal{I}_c が与えられたもとでセルへのなるべく最適かつ規則的な資源割当て $\mathcal{A}_c: C \rightarrow R$ を決定できることが利点の1つである。 \mathcal{I}_c が各セルで共通であることを利用して探索領域を限定し、同じ資源を利用可能なセル集合を一次独立かつ互いに非干渉なベクトル集合^{*1}の線形和で表現できることを示し、そのようなすべてのベクトル集合を探索することで、解の一般的な最適性は証明できていないが、その規則性を満たす範囲では最適な資源割当てを保証するアルゴリズムとしている。なお、そのようなベクトル集合の列挙はクリーク発見問題と同値であり、基本的には総当たりによる列挙でしか得られないが、実質的には \mathcal{I}_c の特性から組み合わせ対象を絞り込むことで探索をあるセルの一定周辺に絞り込む工夫をしている。またあるベクトル集合に対し、それが必要とする資源数を簡単に決定できるアルゴリズムを合わせて設計することで、そのようなベクトルを列挙するだけで (ほぼ) 最適な割当てを効率良く発見できる。

実際にセル c に基地局が配置される場合、 c に割り当てられた資源番号 $\mathcal{A}_c(c)$ とセル全体に割り当てられた資源数 r に対し、セル内の k 番目 ($k = 0, 1, \dots$) の基地局には $\mathcal{A}(c) + k * r$ を割り当てることでどの基地局とも干渉しない資源割当てを実現する。

^{*1} セルは整数座標であるため、一次独立なベクトルの数は2とは限らず、3以上のベクトルが互いに一次独立であることがありうる。

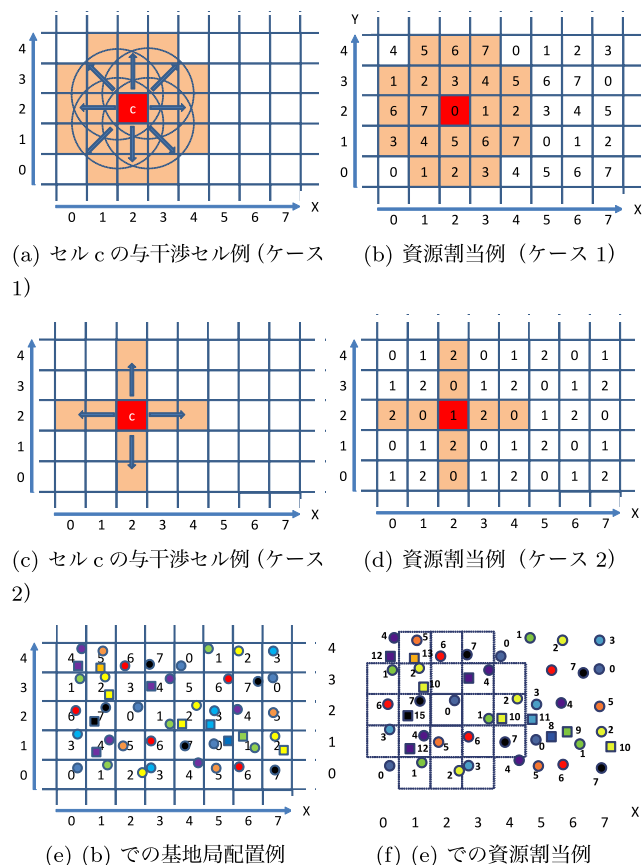


図 1 セルの与干渉と (セルへの) 資源割当て例

Fig. 1 Examples of interference and resource allocation in a cell.

3.2 資源割当て例

図 1 に例を示す. 図 1(a) は赤色のセル c からの干渉例を表す. この例はたとえば障害物のない環境で各基地局が無指向性のアンテナで送信する状況を想定しており, 前節の式 (1) の与干渉モデルにおいて, セルサイズ 100m, 干渉距離 $L = 130\text{m}$ を想定している. これに対する資源割当ての例を図 1(b) に示す. いずれのセルに着目しても, 図 1(a) の干渉パターンのセルとは別の資源が割り当てられていることが分かる (資源数 $|R| = 8$). また, 図 1(c) は前節の式 (2) の与干渉モデルにおいて, セル間干渉最大距離 $L_C = 2$ を想定した例であり, 資源割当ての例は図 1(d) のようになる.

図 1(b) および 図 1(d) のいずれにおいても, 配置は規則的であることが分かり, これらの割当て例はいずれも (この干渉パターン例に対しては) 最小の資源数を実現している.

図 1(b) の割当てに対し, 基地局の配置例を図 1(e) に示す. 各セル c において, 単一の基地局のみ存在する場合は $A(c)$ を利用すればよく, 複数の基地局の場合, セル全体に割り当てられた資源数を r ($r = 8$) で表すと, セル内の k 番目 ($k = 0, 1, \dots$) の基地局には $A(c) + k * r$ を割り当てればよい. 図 1(f) に実際の基地局への例を示す, 任意の

基地局について, 図 1(a) の干渉を想定した割当てをしているため, たとえばセル (2,2) 内で資源 0 が割り当てられた基地局に対し, その干渉範囲内にはその資源が割り当てられた基地局は存在しないことが確認できる.

4. Vector Cover アルゴリズム

提案手法におけるセルの干渉パターンは全セル共通としているが, そのパターンは任意のものを認めているため, そのような任意の干渉パターンに対しても, 最適に近い解を発見する効率の良いプロセスを設計すること, ならびに規則性のある割当てを導出することが目標である.

以降, 2 つのセル c, c' が互いに非干渉である関係 ($c \notin I_c(c') \wedge c' \notin I_c(c)$) を $c \mathcal{F} c'$ で表す. アルゴリズムでは同じ資源を割り当てるとの 2 セルも互いに非干渉であることを保証しなければならない. 本稿では, セル空間上の互いに非干渉な一次独立ベクトルをもとに, セル空間を被覆する割当てを決定する Vector Cover アルゴリズム (VC アルゴリズム) を提案する.

以下では各セルの位置を整数座標と見なし, セル座標をベクトルとして扱う. また, 零でないベクトル c_i, c_j に対し, $c_i = k c_j$ なる整数 k が存在しないとき, それらは一次独立であるという (k も座標も整数である点を実数座標のベクトルとは異なる). あるセル c に対し, 以下の性質を満たすベクトルの集合 $V(c) \subseteq C$ を考える. なお, $V(c)$ の各要素に $-c$ を加えて得られるベクトル集合 (c を起点とした相対ベクトル集合) を $\bar{V}(c)$ で表す. どのセルでも干渉関係は同じであることから, 任意のセル c, c' および u について, $\bar{V}(c) = \bar{V}(c')$ である.

定義 1 $V(c)$ は以下を満たすベクトルの集合である.

性質 1: $\forall c_i \in V(c)$ について, $c_i \mathcal{F} c$

性質 2: $\forall c_i, c_j \in V(c) \cup \{c\}$ に対し, $c_i \neq c_j$ なら $(c_i - c_j + c) \mathcal{F} c \wedge (c_j - c_i + c) \mathcal{F} c$

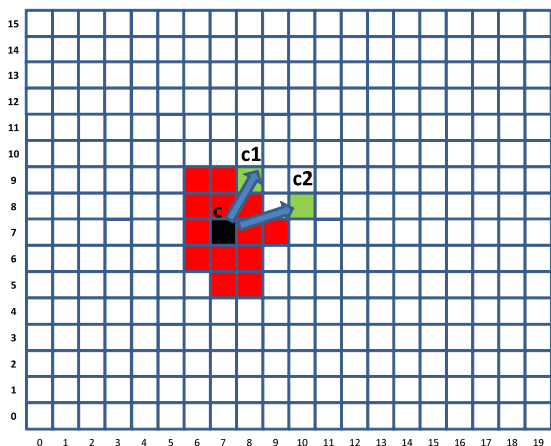
性質 3: $\forall d_i, d_j \in \bar{V}(c)$ は一次独立 (一次独立ベクトル数は実数座標では 2 であるが, 整数座標のため複数になる場合がある)

定義より $V(c)$ のベクトルは c と非干渉であり (性質 1), また互いに非干渉である (性質 2). また, $V(c)$ の c を起点とした相対ベクトルは互いに一次独立である (性質 3). これらの性質をアルゴリズムで利用する. $V(c)$ は一般に複数あるため, 必要に応じて u などの適当なインデックスを用い, $V_u(c)$ のように区別する.

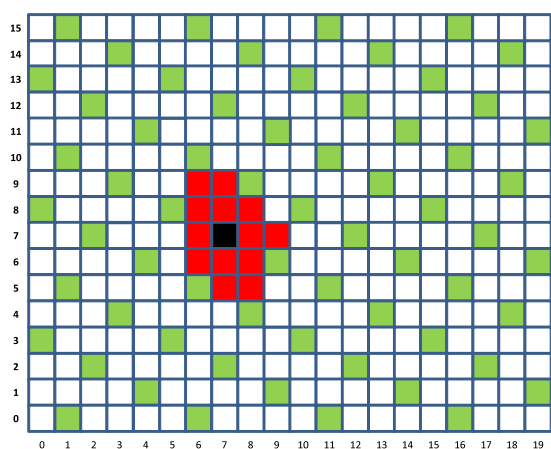
たとえば図 2(a) のセル $c = (7, 7)$ の与干渉セルに対し, $V(c) = \{(8, 9), (10, 8)\}$ は上記の性質をすべて満たすようなベクトルである (同時に $\bar{V}(c)$ も図示している).

次に, $V(c)$ について以下の性質を定義する.

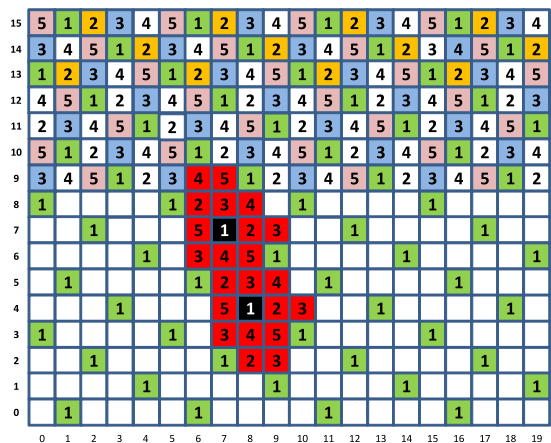
定義 2 $V(c)$ は, どのような $c' = c + \sum_{d_i \in \bar{V}(c)} w_i d_i$ (た



(a) $V(c) = \{c1, c2\}$ ($c = (7, 7)$, $c1 = (8, 9)$, $c2 = (10, 8)$)
は互いに非干渉) $\bar{V}(c) = \{c1 - c, c2 - c\} = \{(1, 2), (3, 1)\}$



(b) $cv(c) = \bigcup_{w_1, w_2} ((7, 7) + w_1(1, 2) + w_2(3, 1))$



(c) 資源割当例 ($|R| = 5$)

図 2 アルゴリズム適用例

Fig. 2 Proposed resource allocation.

だし w_i は整数) に対しても $c' \notin \mathcal{I}_c(c)$ であるとき, c は $V(c)$ について線形非干渉という.

たとえば図 2(b) に示すように, c の与干渉セル群は線形結合のどのセルにもあてはまらないために, $V(c)$ について線形非干渉である. ある $V(c)$ が与えられたときに, c がそれについて線形非干渉かどうかは与干渉セルを 1 つづ

つ検査することで容易に判定できる.

以下, $cv_u(c)$ で $c + \sum_{d_i \in \bar{V}_u(c)} w_i d_i$ (w_i は任意の整数) となるすべてのベクトルの集合を表し, これを c の被覆ベクトル集合とよぶ. これを用いて以下の定理が得られる.

定理 1 $c' \in cv_u(c)$ である任意の c および c' に対し, $cv_u(c) = cv_u(c')$ が成り立つ.

証明: $\bar{V}_u(c)$ は c を起点とし, $\mathcal{I}_c(c)$ および $\mathcal{I}_c(c')$ が同型であるような相対ベクトルの集合であるため, $\bar{V}_u(c) = \bar{V}_u(c')$ が成り立つ. したがって, 任意の $c'' \in cv_u(c')$ に対し, $c'' = c' + \sum_{d_i \in \bar{V}_u(c)} z_i d_i$ である. ここで c' は $c + \sum_{d_i \in \bar{V}_u(c)} w_i d_i$ で表されるため, $c'' = c + \sum_{d_i \in \bar{V}_u(c)} (z_i + w_i) d_i$ となり, $c'' \in cv_u(c)$ が成り立つ. □

上記の定理から, 以下が得られる.

定理 2 c がそれについて線形非干渉であるような, 任意の $V(c)$ から生成した $cv_u(c)$ に対し, $\forall c_i, c_j \in cv_u(c) c_i \mathcal{F} c_j$ が成り立つ.

証明: 定理 1 より, $\forall c_i, c_j \in cv_u(c)$ について, $cv_u(c) = cv_u(c_i) = cv_u(c_j)$ である. $cv_u(c_i)$ は c_i がそれについて線形非干渉なベクトル集合から生成されているため, $\forall c' \in cv_u(c_i) c' \mathcal{F} c_i$ である. また, そのような c' に対し $c' \in cv_u(c)$ であるため, $c' = c_j$ であるとき $c_j \mathcal{F} c_i$. □

以下, $c.x$ ($c.y$) で, c の x 座標 (y 座標) を表す. 最後に以下の定理を得ることができる.

定理 3 c がそれについて線形非干渉な $V(c)$ から生成される $cv_u(c)$ に対し, $\forall c_i \exists c_j \in cv_u(c) c_i \neq c_j$ かつ $c_i.y = c_j.y$ である.

証明: 任意の $c_i \in cv_u(c)$ について, c_i は $c + \sum_k w_k \cdot d_k$ で表される. この c_i に対し, $c_j = c + (d_2.y) \cdot d_1 - (d_1.y) \cdot d_2 + \sum_{k>2} 0 \cdot d_k$ であるような c_j を選ぶと, その c_j は $cv_u(c)$ の要素であり, かつ c_i と同じ y 座標を持つ. □

定理 3 は図 2(b) の $cv(c)$ の例において, $cv(c)$ のセルが等間隔で並んでいることが分かることから確認することができる.

定理 2 より, $cv(c)$ は任意の 2 セルが互いに非干渉であるようなセルの集合であることが分かる. これは, これらのセルには 1 資源を割り当てることができることを意味する. したがって, そのようなセル集合 $cv(c)$ の集合 (これを CV で表す) により領域内のセル全体を被覆することができれば, CV の要素数が資源数であるような資源割当てを決定することができる. ここで, 任意の $cv_u(c)$ に対し定理 3 より, $c_i.y = c_j.y$ である c_i および c_j ($\in cv_u(c)$) が存在する. そのようなセルの組のうち相対距離が最小の c_i および c_j に対して一般性を失うことなく $c_i.x < c_j.x$ とし, セル集合 C_u を,

$$C_u = \{c_k | c_i.y = c_k.y \wedge c_i.x \leq c_k.x < c_j.x\} \quad (3)$$

で定義する。このもとで、資源数を最小とする資源割当てを発見する問題は、ある適当なセル c に対し、

$$\text{minimize: } \sum_{\{u | cv_u(c) \in CV\}} |C_u| \quad (4)$$

$$\text{subject to: } \bigcup_{\{u | cv_u(c) \in CV\}} cv_u(c) = C \quad (5)$$

なる CV を発見する問題として定義できる。以下にその理由を述べる。まず、 C_u のセル c_k に対し、 $cv_u(c_k)$ 内のすべてのセルに同一の資源を割り当てる。同様の操作を C_u の他の各セルにも実施することで、 $cv_u(c)$ の要素が少なくとも 1 つ存在する y 座標上のセル全体が資源数 $|C_u|$ で被覆できることが分かる。 $cv_u(c)$ がすべての y 座標に要素を保持していれば、 $cv_u(c)$ のみを CV とし、そうでなければ網羅的に探索した複数の $cv_u(c)$ の組合せにより、どの y 座標も被覆するベクトル集合 $cv(c)$ の集合を発見しそれを CV とすることで得られるため、上記の問題の解を得ることで各セルへの資源数最小の資源割当てを決定できる。まとめると、そのような CV を見つけるためには、任意の c を 1 つ選んで、 $cv_u(c)$ を網羅的に探索する（あわせて $cv_u(c)$ に対応する C_u を式 (3) に従って計算する）。そして、式 (5) を満足しながら式 (4) を最小化する $cv_u(c)$ の集合を CV として決定すればよいことが分かる。

図 2(c) に例を示す。図 2(b) の $cv_1((7, 7))$ に対し、 $C_1 = ((7, 7), (8, 7), (9, 7), (10, 7), (11, 7))$ であり、 $CV = \{cv_1\}$ である。

5. シミュレーション実験

基地局密度と干渉パターンがそれぞれ異なる人工的なシナリオを用意し、シミュレーションにより必要資源数および資源割当ての規則性を測定した。資源割当ての規則性として、各基地局からそれと同じ資源が割り当てられた最近傍の基地局へのベクトルを計算し、これを最近傍ベクトルとよぶ。すべての基地局組に対し最近傍ベクトル間の cosine 値の平均値（近傍 cosine 値とよぶ）、および最近傍ベクトルのノルムの平均値（近傍距離とよぶ）を測定した。近傍 cosine 値は 1 であるときその方向が一致するため、規則性を表現できる。また近傍距離はどの程度同資源が密に利用されているかを表現する。したがって、近傍 cosine 値が 1 に近く、かつ近傍距離が小さいほど、規則性が高く資源を密に割り当てられていることを表す。

対象領域は $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ の正方領域とし、領域を 50 m セル化して各セルに基地局を漏れなく配置した場合（総数 400）の密度を 1 とし、基地局密度が 0.1 から 1.0 になるようにそれぞれ基地局をランダムに配置した。提案手法では、式 (1) で与えられる干渉モデルを利用し、おおよその最大干渉距離の見積り L_C を 150 m, 200 m, 250 m としている。したがって、基地局密度 1, 最大干渉距離 250 m

の場合、ある基地局に対し最大で 80 程度の基地局に干渉を与えることになる。

ベンチマークとして、ある基地局をランダムに初期値として選択し、すべての基地局間の干渉関係があらかじめ分かっているもとで非干渉な最近傍の基地局（セルでないことに注意されたい）をランダムに選択して同じ資源を割り当てていく方法（非干渉基地局グリーディ割当てアルゴリズム、以下 Station-based Greedy (SG) アルゴリズム）をベンチマークとする。SG アルゴリズムはすべての基地局の位置やその干渉関係が分からないと利用できないアルゴリズムであり、セルとは無関係に、与えられた状況におけるなるべく良い解を（グリーディな方法ではあるが）発見する方法である。したがって規則性は考慮されず、前述の理由から一般的な運用には望ましくない。しかし、基地局への最適な資源配分を求めるのは計算時間的に現実的ではないため、このアルゴリズムの性能を、提案アルゴリズムが規則性を実現しながらどこまで資源数最適化を図れるかのベンチマークとする。後述するが、SG アルゴリズムは基地局密度が上がれば近傍距離が最適値に近づくことが観測されているため、空間的な資源再利用効率の観点からは簡易ながら比較的高い性能を達成するアルゴリズムであると考えられる。一方、提案するアルゴリズム (Vector Cover (VC) アルゴリズム) は、基地局の配置にかかわらず、セルの関係だけで資源配分を決定し、完全な規則性を実現する。したがって、資源配分率は基地局密度によらずつねに一定であり、近傍 cosine 値はつねに 1, 近傍距離も一定値である。この値が SG アルゴリズムとどのような関係にあるかが性能評価の論点となる。

図 3 に結果を示す。いずれのグラフも横軸は基地局配置密度であり、1.0 の場合で領域に 400 機が存在する。各設定値につき 10 の（異なる基地局配置の）シナリオを生成し、それらに対する割当て結果を示している。図 3(a), 図 3(b), 図 3(c) に必要資源数を示す。SG アルゴリズムは基地局密度が低いときは、所要資源数が少ないものの、どの図においても基地局密度が 0.7 を超えたあたりから VC アルゴリズムと逆転し、図 3(c) で基地局密度 1 の場合（シナリオ中最もシビアなケース）では 30% 程度も余分に資源を必要とする。また、図 3(d), 図 3(e), 図 3(f) に近傍 cosine 値を示す。SG アルゴリズムの近傍 cosine 値平均は 0 付近であり、図示はしていないものの平均化以前の値は正負に広く分布していたことから、規則性はほぼ皆無と考えられる。一方で、図 3(g), 図 3(h), 図 3(i) より、SG アルゴリズムの近傍距離は低密度下では VC アルゴリズムを大きく上回っており、SG アルゴリズムは資源利用率（空間再利用率）の点で VC アルゴリズムに劣るものの、基地局密度の増加にともない小さくなり、VC アルゴリズムのそれに漸近している。したがって、高密度下での SG アルゴリズムの空間再利用率はそれほど悪くないことが読み

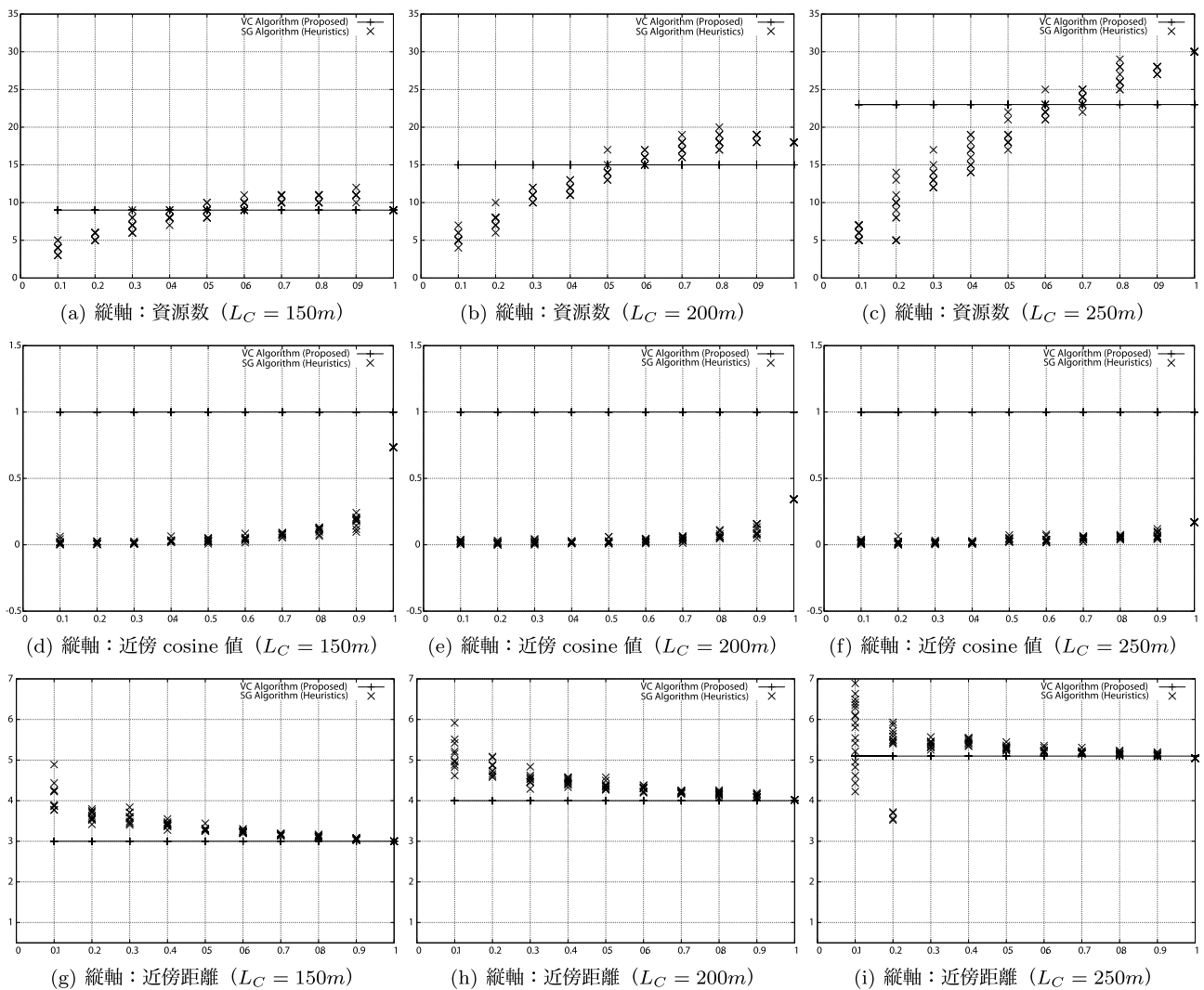


図 3 シミュレーション結果 (横軸：基地局密度)

Fig. 3 Simulation results.

取れる。この SG アルゴリズムと比較し、VC アルゴリズムは基地局の有無にかかわらず一定の (最適に近い) 資源数ならびに一定の高空間再利用率を実現でき、地理にリンクした規則的な割当てを実現していることが分かる。このような性質は、後述する ITS 路側機などインフラとして利用資源変更や干渉関係の把握が容易でないシステムなどに最適であるといえる。

6. ITS における路側機配置設計への応用

6.1 路側機配置設計にかかる背景

近年、路車間・車車間通信による安全運転支援通信システムの開発が世界各地で行われている [1], [18], [19]。日本では、ETC など ITS 用周波数帯として 5.8 GHz 帯が主に用いられており、この周波数を用いた車車間通信の検討も行われている。一方、地上アナログテレビジョンのデジタル化にともなう周波数の再分配において、2011 年 12 月に 760 MHz (帯域幅：10 MHz) を高度道路交通システム用に割り当てる旨が公示された。従来の 5.8 GHz より周波数が

低いため、特に市街区における見通しの悪い場所 (ビル街など) における電波の回折到達が期待できるため車両にサービスを提供できるエリアを拡大でき、路側機が交差点付近に位置する車両の存在を通知する、個々の車両が周辺車両間通信により直接位置走行情報を交換するなど、安全系サービスへの応用が期待される。その一方で、帯域幅が 5.8 GHz 帯の約 7 分の 1 に限定されることから、限られた帯域をなるべく効率良く利用し、路車間、車車間通信を含む通信効率を向上させることが望ましい。これには一定間隔で情報発信する (多数の) 車両からの通信が路側機から車両へのブロードキャスト通信に与える干渉を避けることと、路側機間の干渉を避けることが重要となる。

これらの課題に対しては、路車間・車車間通信を時分割する方法が提案されている [17]。この手法では ITS 路側機、車両のデータ送信周期 (通常 100 ms) を基準に、100 ms を一つの通信フレームとして、フレームを路車間通信用、車車間通信用に時分割する。具体的には、ITS 路側機はフレーム中に最大 16 個配置できる路車間通信期間 (路車間

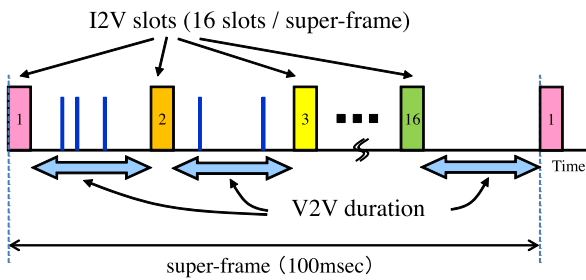


図 4 100 ms super-frame における I2V スロットと V2V 通信期間 [17]

Fig. 4 I2V slots and V2V duration with 100 ms super-frame [17].

通信スロットとよぶ) を使用して TDMA により路車間通信を行い, 車両はそれ以外の期間を CSMA により車車間通信を行う (図 4). このとき, ITS 路側機が路車間通信を行う際に路車間通信期間を通知することで, 車両が路車間通信期間の使用有無を把握できる. しかし通信フレームのうち, 車両は路車間通信期間を除いた残りの期間で車車間通信を行うため, 車車間通信に十分な通信資源を提供するためにはなるべく路車間通信期間を短くできることが望ましい. 路側機は一般に交差点付近に設置されることが多いが, 特に都市部では, 道路の密度が高い (多くの交差点が存在する) ことから, 単純な TDMA スケジューリングでは路車間通信期間が増大しがちである. これを避けるためには, 空間分割に基づき干渉しない路側機が同スロットを用いるような時分割スケジューリングが望まれる.

6.2 路側機の時分割スケジューリング

以下, 路側機を Roadside Unit (RSU) とも表記する. 路車間通信期間と車車間通信期間をあわせた周期 (通信フレーム) は 100 ms であり, このスロット先頭から Z スロット (最大 16 スロット) が路車間通信用として割り当てられるものとし, 各路側機はそれらの路車間通信スロットのうちいずれかを利用する.

路側機は交差点に設置するものとし, 交差点のサービスエリア (路側機からの交差点情報が提供されるべき範囲) は, 交差点の周辺道路 240 m に設定されているものとする. ここで, 近隣の路側機どうしが同じ路車間通信スロットでそれぞれ別のサービスエリアに対してサービスを提供している場合, それが発する電波信号は, 互いに干渉波となる. これを考慮した場合, サービスエリア内の各地点において復号可能受信レベル (最低受信感度) を満たし, かつ所要希望波対非希望波率 (以下, 所要 DUR) にフェージングマージンを加えた値がある閾値を超えることが条件となる. ここで, 所要 DUR およびフェージングマージンの閾値は, 実際にサービスを想定する環境に合わせて設定すべき項目であるが, 本研究では所要 DUR を 14 dB, フェージングマージンを 4.4 dB, 非希望波を送信する RSU が複

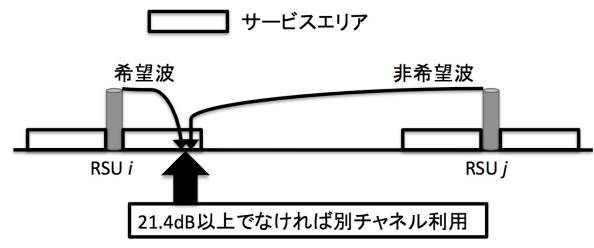


図 5 希望波と非希望波 (DUR)

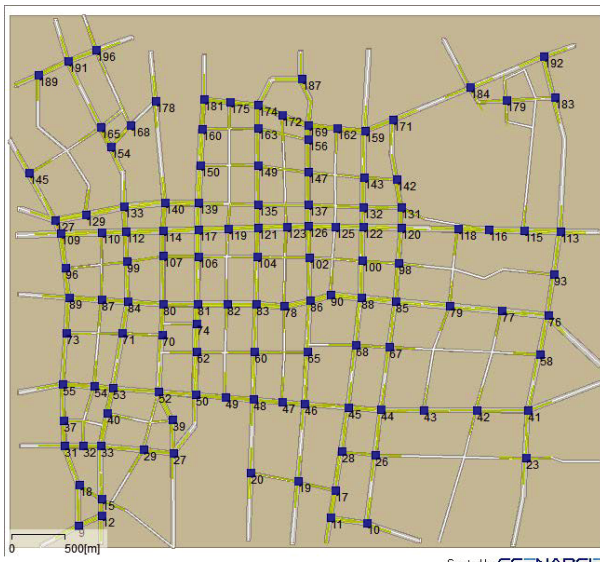
Fig. 5 Desired signal and undesired signal (DUR).

数ある場合の影響を 3 dB と定める [20], [21], [22]. 以上より, 各 RSU は自身が担当するサービスエリアのすべての地点で DUR を 21.4 dB 確保することを条件とする. このもとで, ITU-R P.1411-1 勧告の電波伝搬損失モデルに従い, かつある路側機が設置された交差点を中心とした 230 m から 240 m 程度をその路側機のサービスエリアとした場合, 干渉を与える路側機は少なくとも 750 m 程度離れていなければならないことが計算できる. 図 5 に干渉の概念図を示す.

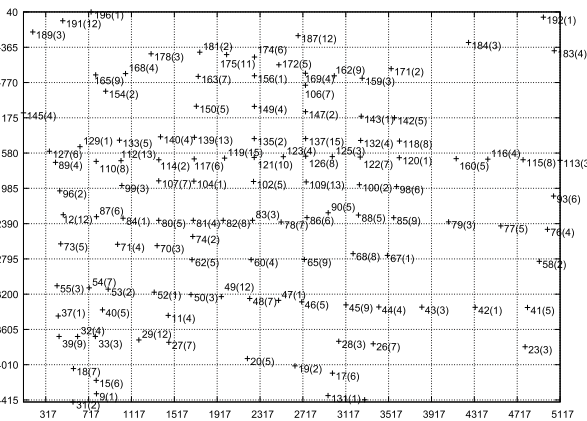
以上の条件のもとで, 大阪市中央区の 5 km × 5 km の領域における主要幹線道路交差点に 121 の路側機を配置した状況 (図 6) で, 路車間通信スロットの総数 Z を最小にするような各路側機への資源割当てを, 提案する VC アルゴリズムと前述の SG アルゴリズムで行った. 干渉計算は ITU-R P.1411-1 勧告の電波伝搬損失モデルを実装した Scenargie シミュレータ [3] を用いて行っている.

ここで, VC アルゴリズムにおけるセルサイズはアルゴリズムに大きく影響する. 一般に, 各セルに r の RSU が含まれ, かつセル間干渉を避けるための必要資源数 (VC アルゴリズムで得られる資源数) を k とした場合, 最大で $k \cdot r$ の資源数が全体で必要となるが, セルサイズが大きい場合 (粗分割の場合) は, セル間干渉パターンが大きいセルでおおまかに表現されるためにパターン数や 1 セルあたりの干渉セル数は少なくなり, k が小さくなる一方で, 1 セルあたりの RSU 数は多くなるために r が増大する. 小さい場合はこの逆となる. このようなトレードオフ関係やセルサイズにより異なるセル間干渉パターンなどを考慮したセルサイズ最適化アルゴリズムを設計することは容易でないと考えられるため, 本稿では, セルサイズを 5 m ステップで変更して $k \cdot r$ を網羅的に計算する測定試行を実施してセルサイズを決定した. その結果, 400 m × 405 m が最小であったためこれを用いている (各セルにはたかだか 3 つの RSU が含まれる). セル分割結果は図 6 (b) を参照されたい. 次に, セル間干渉の扱いが重要となる. VC アルゴリズムではセル間干渉を予測するための干渉モデルが必要となるが, 現実と比べて過度な干渉を推定するモデルは資源数増大を招き, 逆に過小推定をするモデルは干渉を資源割当てで回避できない可能性も生じる.

本実験では前述のように, ITU-R. P.1411-4 [2] 電波伝搬



(a) 路側機 (121 機) の配置



(b) 路側機への資源割当て (13 資源)

図 6 大阪市中央区の 5 km × 5 km 区画における路側機配置と資源割当て

Fig. 6 A resource allocation for base stations at Chuo-ku Osaka city (5 km × 5 km square).

損失モデル (760 MHz 帯) を用い、DUR 閾値を 21.4 dB に設定している。これらによるいくつかのシミュレーション結果から、街路沿いの見通し通信では、(400 m × 400 m 程度のセルなら) 3 セル、ビルなどによる非見通し通信では 2 セル程度のセル間干渉が一般的に発生することが分かっている。一般に、都市部道路の多くは平行または垂直方向であり、格子に近い形状を構成しているが、すべての道路が同方向に整列されているわけではなく、セル間干渉のパターンが異なる場合も多くある。提案手法では同型のセル間干渉を前提としているため、すべての異なるセル間干渉を包含する共通のセル間干渉パターンを利用する必要があるが、例外的な干渉パターンを含めていくと共通のセル間干渉パターンが大きくなり、資源割当ての効率が低下する。したがって、これらの例外的干渉パターンを除外したうえで VC アルゴリズムを適用し、その後除外した干渉パターン処理を実施するようにした。

6.3 資源割当て結果

例外パターンを除外した干渉パターンにおいて VC アルゴリズムで割当てを実施した結果、必要な資源数は 5 であった。これに対し、1 セル内の最大路側機数は 3 であるため、たとえば VC アルゴリズムにより資源 k ($1 \leq k \leq 5$) が割り当てられたセルに対し、 $k+5$ および $k+10$ の資源を割り当てれば、総数 15 ですべての路側機に資源割当てを行えることが分かる。これに対し、路側機間干渉 I のうち、同じ資源が割り当てられた路側機の組 (干渉路側機組とよぶ) は 22 であった。これらの各路側機組に対しては異なる資源を割り当てる必要がある。その一方で、実際には干渉していないにもかかわらず異なる資源を割り当てられている組もある。これに対し提案手法では、資源 k , $k+5$ および $k+10$ のセル内の路側機への割当てのすべての可能性を列挙し、干渉路側機組を解消するような割当てを発見する手法を採用する。この方法を用いることで、割当ての規則性を失うことなく、干渉路側機組の存在を解消できる割当てが (もしあれば) 発見できる。

この結果、すべての干渉路側機組を解消し、かつ 15 資源中のうち 2 資源を未使用とできるような割当て (すなわち完全な規則性を 13 資源で実現する割当て) を発見できた ($R = \{1, 2, \dots, 15\} - \{11, 14\}$, 図 6 (b) に割当てを示す)。これに対し、SG アルゴリズムは 10 資源と提案手法より少ないが、これはすべての路側機組の干渉の情報を必要とするため現実的には実現が難しい。また近傍 cosine 値は 0.054 であり、規則性はほぼないといえる。さらに、各セルに 3 つの路側機が配置された密度を 1 としたときの基地局配置密度は 0.6 であるが、前章のシミュレーション結果から、SG アルゴリズムではこの値が 0.7 やそれ以上に増加すると必要資源数が急激に増大することを考慮すると提案手法の十分な優位性が確認できている。

7. おわりに

本稿では、無線基地局が密に設置され、将来的に追加設置されていくような地理空間環境において、無線資源の高い利用率と、資源管理の容易性をともに達成する空間再利用型時分割多重アクセス (STDMA) スケジューリング技術を提案した。

一般の資源割当て問題は、基地局間干渉が既知の場合に、時分割スロット集合などの資源集合を基地局に割り当てる問題として定式化されることが多いが、基地局が密に設置されている場合は干渉関係が非常に複雑となり、その情報を収集するコストや将来の基地局追加変更などに対する再設定の手間を考慮した場合には得策でない。提案手法は、そのような情報を利用する代わりに、領域をセル分割し、それらのセルに基地局がある程度密に配置された場合に生じるであろう干渉関係の見積り (潜在的に生じる干渉関係) に基づき、セル位置から一意に割当て資源を決定できるよ

うな規則的資源割当てアルゴリズムを提案している。基地局は自身の設置座標からセル位置を特定することで利用可能な資源を容易に決定できるメリットがあり、その規則性のもとで資源利用効率の良い割当てを実現できる。また、新たな基地局を加える際も、既存の基地局への資源割当てになるべく影響を与えないような資源割当てを導出することができ、基地局の運用を考慮した点でも既存研究とは一線を画している。加えてアルゴリズムが正しい割当てを実現できることの証明も与えている。

網羅的なシミュレーション実験により、(1) 資源割当ての規則性 (管理の容易性)、(2) 必要資源数の最適性、の2点から提案手法の有効性を示した。また、大阪市中央区の区画を対象に、高度交通システム向け帯域を路側機間で時分割利用する設計事例に応用し、有用性を検証した結果、760 MHz 帯における時分割スロットの利用提案 [17] で示されている上限スロット数 16 を下回る資源割当てを実現できた。比較対象のアルゴリズムでは、資源数が提案手法より少なかったものの、すべての路側機組の干渉の情報を必要とする点で現実的でなく、割当ての規則性もないことから、提案手法の十分な優位性が確認できている。

今後は提案手法の最適性を理論的に追求するとともに、アルゴリズムの計算量についても議論したい。また、実際の運用面として、資源配分とスループットとの関連、通信量や通信パターン (たとえば上り下りでの非対称トラフィック) を考慮したアルゴリズム設計などを行い、いっそうの実用性も追求していきたい。

参考文献

- [1] (社) 新交通管理システム協会, 入手先 <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
- [2] Recommendation ITU-R P.1411-5, Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300MHz to 100GHz (2009).
- [3] Space-Time Engineering, Scenargie High Quality System Simulation Framework, available from <http://www.spacetime-eng.com/en/>.
- [4] Giuliano, R., Monti, C. and Loreti, P.: WiMAX Fractional Frequency Reuse for Rural Environments, *Wireless Communications*, Vol.15, No.3, pp.60-65, IEEE (online), DOI: 10.1109/MWC.2008.4547524 (2008).
- [5] Jing, S., Tse, D.N.C., Soriaga, J.B., Hou, J., Smee, J.E. and Padovani, R.: Multicell Downlink Capacity with Coordinated Processing, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, Vol.2008, pp.18:1-18:19 (online), DOI: 10.1155/2008/586878 (2008).
- [6] Karakayali, M., Foschini, G. and Valenzuela, R.: Network Coordination for Spectrally Efficient Communications in Cellular Systems, *Wireless Communications*, Vol.13, No.4, pp.56-61, IEEE (online), DOI: 10.1109/MWC.2006.1678166 (2006).
- [7] Jindal, N., Andrews, J. and Weber, S.: Bandwidth Partitioning in Decentralized Wireless Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.7, No.12, pp.5408-5419 (online), DOI: 10.1109/T-WC.2008.071220 (2008).
- [8] Veronesi, R., Tralli, V., Zander, J. and Zorzi, M.: Distributed Dynamic Resource Allocation with Power Shaping for Multicell SDMA Packet Access Networks, *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2004*, Vol.4, pp.2515-2520, IEEE (online), DOI: 10.1109/WCNC.2004.1311484 (2004).
- [9] Wieselthier, J.E., Barnhart, C.M. and Ephremides, A.: A Neural Network Approach to Routing Without Interference in Multihop Radio Networks, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.42, No.1, pp.166-177 (1994).
- [10] Barnhart, C.M., Wieselthier, J.E. and Ephremides, A.: A Neural Network Approach to Solving the Link Activation Problem in Multihop Radio Networks, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.43, No.234, pp.1277-1283 (1995).
- [11] Kumar, V.S.A., Marathe, M.V., Parthasarathy, S. and Srinivasan, A.: Algorithmic Aspects of Capacity in Wireless Networks, *Proc. SIGMETRICS*, Vol.33, No.1, pp.133-144 (2005).
- [12] Wang, W., Wang, Y., Li, X.-Y., Song, W.-Z. and Frieder, O.: Efficient Interference-aware TDMA Link Scheduling for Static Wireless Networks, *Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '06*, pp.262-273, ACM (online), DOI: 10.1145/1161089.1161119 (2006).
- [13] Grönkvist, J. and Hansson, A.: Comparison between Graph-based and Interference-based STDMA Scheduling, *Proc. 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing, MobiHoc '01*, pp.255-258, ACM (online), DOI: 10.1145/501449.501453 (2001).
- [14] Brar, G., Blough, D.M. and Santi, P.: Computationally Efficient Scheduling with the Physical Interference Model for Throughput Improvement in Wireless Mesh Networks, *Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '06*, pp.2-13, ACM (online), DOI: 10.1145/1161089.1161092 (2006).
- [15] Amdouni, I., Minet, P. and Adjih, C.: Node Coloring for Dense Wireless Sensor Networks, Technical Report, INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE (2011).
- [16] Li, X.: *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks - Theory and Applications*, Cambridge University Press (2008).
- [17] (社) 電波産業会: 700MHz 帯高度道路交通システム ARIB-STD T 109 1.1 版, 入手先 <http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T109v1.1-E1.pdf>.
- [18] 国土交通省, 入手先 <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>.
- [19] USDOT: CICAS Project, available from <http://www.its.dot.gov/cicas/>.
- [20] 浅見重幸, 新井国充: 車々間通信に適した通信制御プロトコルの検討 (2008), 入手先 http://www.jrc.co.jp/jp/company/html/review55/pdf/JRCreview55_11.pdf.
- [21] 総務省情報通信審議会情報通信技術分科会, 入手先 http://www.soumu.go.jp/main_content/000117297.pdf.
- [22] ITS FORUM: DSRC システム基地局設置のガイドライン RC-003 (平成 15 年 4 月 30 日), 入手先 <http://www.itsforum.gr.jp/Public/J7Database/p23/DSRCguideline.pdf>.

推薦文

本論文では、無線基地局が密に設置されたり、将来的に追加設置されていくような地理空間環境において、無線資源の高い利用効率と、資源管理の容易性をともに達成する空間再利用型時分割多重アクセス (STDMA) スケジューリングアルゴリズムを提案している。本研究は、領域間の干渉を最小化する最適化問題として問題を定式化し、これを解くアルゴリズムを提案したうえで、実環境での有用性を評価しており、高度なアルゴリズムでありながら実用性が高く、実用化が期待できる。以上より本論文は推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 11 年同大学大学院基礎工学研究科助手。平成 19 年より同大学大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モ

バイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



廣森 聡仁 (正会員)

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 17 年株式会社 NTT ドコモ入社。平成 20 年より大阪大学大学院情報科学研究科助教。博士 (工学)。モバイルアプリケーションやモバイルネットワークの

設計および性能評価に関する研究に従事。IEEE 会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散システム、通信プロトコル、モバイルコン

ピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会、ACM 各会員。IEEE Senior Member。



梅原 茂樹

平成 23 年奈良先端科学技術大学院大学修士課程修了。同年住友電気工業 (株) 入社。以来、ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



浦山 博史

平成 12 年名古屋大学工学部電気電子情報工学科卒業。平成 14 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 豊田自動織機入社。平成 20 年住友電気工業 (株) 入社。以来、ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



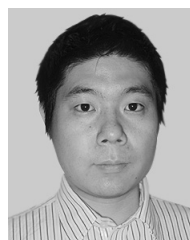
山田 雅也

昭和 61 年神戸大学工学部システム工学科卒業。同年住友電気工業 (株) 入社。以来、ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



前野 誉

平成 20 年新潟大学大学院修士課程修了。同年 (株) スペースタイムエンジニアリング入社。以来、移動通信システムに関する研究・開発に従事。



金田 茂 (正会員)

平成 13 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。平成 15 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年株式会社 NTT ドコモ入社。現在、米国法人スペースタイムエンジニアリング

Director of Engineering, ならびに大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程在学中。移動通信システム、性能評価手法に関する研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。



高井 峰生 (正会員)

平成9年早稲田大学大学院博士後期課程修了。平成19年米国法人スペースタイムエンジニアリング設立。現在、カリフォルニア大学ロサンゼルス校主幹開発研究員ならびに大阪大学大学院情報科学研究科招へい准教授。モバイル通信システムおよびその評価方法についての研究に従事。ACM, IEEE 各会員。