

無線 LAN 保護のための仮想専用チャネル構築法における 媒体予約期間通知フレームの送信電力に関する一検討

藤澤 健太[†] 宮本 伸一[†]
Kenta Fujisawa Shinichi Miyamoto

1. まえがき

IEEE 802.11 標準規格 [1] 準拠の無線 LAN (Local Area Network) は, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式に則って他の無線 LAN と周波数資源を共用する. そのため, 同一周波数チャネルで運用される複数の BSS (Basic Service Set) が共存する環境では, 各 BSS の伝送性能は周波数資源を共用する他の BSS のトラヒックや伝搬路状況に左右され, スループットや遅延などの QoS (Quality of Service) を保証することは原理的に不可能である.

この問題に対し, 無線 LAN において, AP が自 BSS 内の各端末のトラヒック状況や伝搬路状況等に関する情報を収集し, それらの情報に基づいて動的に無線周波数資源を付与する, 集中制御型 RRM (Radio Resource Management) 手法が提案されている [2]-[4]. この手法では, 自 BSS に属する端末群の情報を AP が集中管理し, それら端末群への周波数資源の割り当てを AP が一括管理することで, 高い確率で QoS を保証できる. しかしながら, 既存手法の多くは, 単一の BSS 内で集中管理型 RRM を行うものであるため, 周波数資源を共用する BSS が複数存在する場合には, 自 BSS が周波数資源を獲得できる可能性は低下し, QoS 保証は困難になる.

複数の BSS が稠密に存在する環境で QoS を補償するための技術として, 同一空間に遍在する複数の BSS が互いに協調し, 集中制御型 RRM を実施する手法 [5] も提案されている. この手法は, 複数の BSS のうち, ある一つの BSS の AP が集中管理局となり, 協調関係にある全ての BSS の端末群への周波数資源の割り当てを行う. しかし, 一般に, 不特定多数の第三者を含む複数の BSS が互いに連携することはセキュリティの観点からも非現実的であり, また, 個々の BSS の位置や距離によっては BSS 間の協調が十分に機能せず, 効率的に周波数資源を付与することはできなくなる.

このような背景の下, モバイルルータ等の普及により BSS そのものが移動し, 複数の BSS が稠密に存在し得る現在, 無線 LAN においても QoS を保証するための新たな技術開発が求められているものの, 不特定多数の BSS が共存する環境下で高確率に QoS を保証し得る技術は未だ十分に見出されていない.

ここで, 無線 LAN が運用される場所に着目すると, 駅や街中などの公共空間では, アンライセンスバンドはその空間に滞在する利用者全体で享受されるべき周波数資源である. 一方, 学校や工場など比較的広域なプライベート空間では, プライベート空間の所有者 (空間所有者, エリアオーナー) がアンライセンスバンドの周波数資源を優先して使用する利用形態も考えられる.

このような利用形態を実現し得る方法の一つとして, これまでに我々は, エリアオーナー専用チャネルを仮想的に構築する仮想専用チャネル構築法を提案した [6]. 仮

想専用チャネル構築法では, エリアオーナーによって分散配置された端末 (守衛端末) から, 外来者が運用する BSS (外来 BSS) に対して, 媒体予約期間 (送信禁止期間, NAV, Network Allocation Vector) を通知するための制御フレーム (NAV フレーム) を周期的に伝送することで, エリアオーナーが優先的に使用可能な専用チャネルを仮想的に構築し, エリアオーナーが運用する BSS (エリアオーナー BSS) は外来 BSS の影響を受けることなく, 安定した伝送性能を確保できる領域の確立を目指す. 本稿では, プライベート空間において, 外来 BSS の影響を受けることなく, エリアオーナー BSS が安定した伝送性能を確保できる領域を保護領域と呼ぶ.

仮想専用チャネル構築法で安定した伝送性能を確保するためには, プライベート空間内の保護領域で運用されるエリアオーナー BSS に影響を及ぼす可能性のある外来 BSS に対して確実に媒体予約期間を通知する必要がある. 開空間を伝搬路とし, その伝搬路状況が確率的に時々刻々と変動する無線 LAN において, エリアオーナー BSS に影響を及ぼす可能性のある外来 BSS に対して媒体予約期間を確実に通知する方法として, 守衛端末から十分に高い送信電力にて NAV フレームを送出し, プライベート空間を超える広範囲な領域に亘って媒体占有期間を報知する手法が考えられる. しかしながら, 十分に高い送信電力で NAV フレームを送出してしまうと, プライベート空間外の広範囲な領域で不特定多数の外来 BSS の伝送を妨げてしまうため, 空間外への NAV フレームの過剰な伝搬は抑制されなければならない. これら相反する要求の下, 仮想専用チャネル構築法において, プライベート空間内に保護領域を確保しつつ, 空間外に存在する外来 BSS の伝送を過剰に阻害しないためには, 守衛端末の NAV フレーム送信電力と保護領域の面積ならびに外来 BSS の伝送性能に及ぼす影響の関係を計算機シミュレーションにより場当たりに模索するのではなく解析的に明らかにし, NAV フレーム送信電力に関する設計指針を確立することが重要な課題である.

以上の考えの下, 本稿では, 仮想専用チャネル構築法における守衛端末の NAV フレーム送信電力の設計指針の確立を目的として, NAV フレーム送信電力と保護領域の面積ならびに外来 BSS の伝送性能に及ぼす影響の理論解析を行う.

2. 仮想専用チャネル構築法

2.1 DCF 方式および NAV を用いた媒体予約機構

無線 LAN は, DCF (Distributed Coordination Function) 方式 [1] により, 同一伝送空間内に共存する他の無線 LAN とアンライセンスバンドの周波数資源を共用している. DCF 方式では, フレームの送信を試みる端末は, DIFS (DCF Inter-Frame Space) 期間に亘りキャリアセンス

[†] 和歌山大学 大学院システム工学研究科,
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

を行い、周辺のチャンネルの使用状況を確認する。キャリアセンス期間中に他端末が送信したフレームのプリアンブルを検出した場合や、あらかじめ規定されているキャリアセンスレベル以上の受信電力を検知した場合、端末はチャンネルが使用中である (Busy) と判断して送信を待機する。一方、DIFS 期間にチャンネルが未使用 (Idle) と判断した場合、端末はランダムなバックオフ時間 T_{BO} を設定し、この期間中はキャリアセンスを継続する。

DCF 方式では、個々の端末がランダムにバックオフ時間 T_{BO} を設定することで、全ての端末が均等に送信機会を獲得することができる。しかしながら、それゆえ、時々刻々と変動するトラフィック状況や伝搬路状況に応じた送信機会の獲得がなされず、QoS 保証や周波数資源の有効利用に適した伝送方式ではない。

また、DCF 方式を導入したとしても、距離減衰等により、周波数資源を共用する他の AP や端末から送出された信号を認知できず、フレーム衝突が発生する可能性がある。この現象は隠れ端末問題と呼ばれる。隠れ端末問題に対する対策として、IEEE 802.11 標準規格では、RTS (Request to Send)/CTS (Clear to Send) フレーム交換を用いた媒体予約機構が導入されている [1]。RTS/CTS フレームには、端末が周波数資源を利用する期間が記載されており、これらのフレームを傍受した周辺端末は、記載された期間に亘る媒体予約期間 (NAV) を設定し、伝送を待機する。RTS/CTS フレーム交換の導入により、送信元端末の信号をキャリアセンスできない端末が存在しても、宛先端末から伝送される CTS フレームを受信できれば送信元端末の周波数資源を占有する期間を認知できる。

2.2 媒体予約機構を用いた仮想専用チャンネル構築法

上述のように、不特定多数の BSS での自律的な周波数資源の共用が求められる無線 LAN では、QoS を保証することは原理的に不可能である。しかしながら、無線 LAN が運用される場所に着目し、公共空間で使用されるライセンスバンドの周波数資源はその空間に滞在する利用者全体で享受されるべきであるものの、学校や工場、スタジアムなど比較的広域なプライベート空間に限れば、無線 LAN に割り当てられた周波数チャンネルの一部を当該空間の所有者 (エリアオーナー) が占有する周波数資源の利用形態も許容され得ると考えられる。プライベート空間外の無線 LAN に影響を及ぼさないという条件の下、エリアオーナー専用チャンネルを設けることができれば、他者の影響を受けない無線 LAN を構築できると期待される。

この考えの下、これまでに我々はエリアオーナー専用チャンネルを仮想的に構築する仮想専用チャンネル構築法を提案した [6]。仮想専用チャンネル構築法のシステム構成および媒体アクセス制御 (MAC) プロトコルを、それぞれ、図 1 および図 2 に示す。この手法では、エリアオーナーによって分散配置された守衛端末から、エリアオーナー BSS に影響を及ぼす外来 BSS に対して媒体予約期間が記載された制御フレーム (本稿では NAV フレームと呼ぶ) を伝送する。NAV フレームを伝送し、外来 BSS に対し媒体予約期間を通知した後、DATA フレームを伝送するものとし、これを媒体予約周期 T_{INT} 毎に継続して繰り返す。

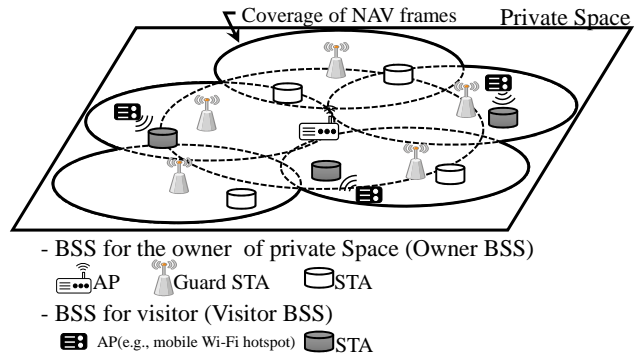


図 1: 仮想専用チャンネル構築法のシステム構成図

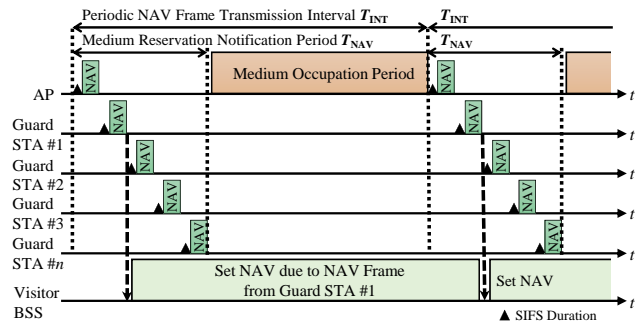


図 2: 仮想専用チャンネル構築法の MAC プロトコル

2.3 仮想専用チャンネル構築法の課題

仮想専用チャンネル構築法において、エリアオーナー BSS が安定した伝送性能を確保するためには、エリアオーナー BSS に影響を及ぼす外来 BSS へ確実に媒体予約期間を通知する必要がある。開空間を伝搬路とし、その伝搬路状況が確率的に時々刻々と変動する無線 LAN において、エリアオーナー BSS に影響を及ぼす可能性のある外来 BSS に対して媒体予約期間を確実に通知する方法として、守衛端末から十分に高い送信電力にて NAV フレームを送出する手法が考えられる。存在地点を把握できない外来 BSS が伝送空間内に共存する環境の下、守衛端末から十分に高い送信電力にて NAV フレームを送出することにより、エリアオーナー BSS に影響を及ぼす可能性のある外来 BSS に対し確実に媒体予約期間を通知できるものと期待される。

一方、外来 BSS を主体として考えると、NAV フレームを傍受した外来 BSS は、媒体予約期間だけ自身の伝送を待機するため、高い送信電力で NAV フレームを送出してしまおうと、より広範囲な領域に亘り外来 BSS の伝送が阻害されることとなる。外来 BSS がプライベート空間内に滞在している場合であれば、当該外来 BSS の伝送が阻害される状況もある程度許容され得ると考えられるものの、プライベート空間外に滞在する外来 BSS であっても、伝送が阻害される状況はできる限り回避されるべきである。この考えに従うと、プライベート空間内に滞在する外来 BSS に対しては着実に媒体占有期間を通知しつつ、空間外に滞在する外来 BSS に対しては媒体占有期間を通知しないように、仮想専用チャンネル構築法における守衛端末の NAV フレーム送信電力を決定する必要がある。しかしながら、一般に、無線信号を用いた情報伝送の成否は確率的であるため、NAV フレーム

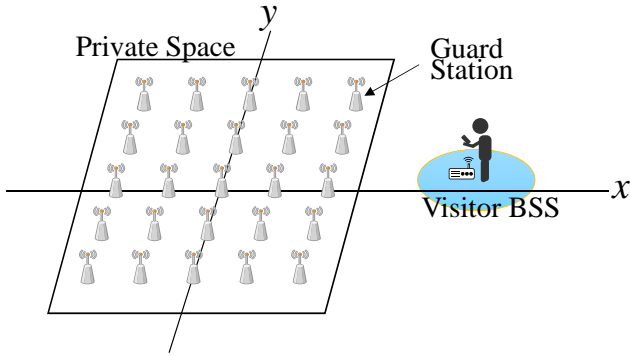


図3: 解析モデル

を誤りなく伝送可能な領域をプライベート空間内に限定することは不可能である。また、外来 BSS が影響を及ぼす領域は外来 BSS の送信元を中心として面的に広がりをもったものであるため、たとえ NAV フレームを誤りなく伝送可能な領域をプライベート空間内に限定できたとしても、プライベート空間境界の外側近傍に外来 BSS が出現した場合など、プライベート空間内に外来 BSS からの影響を受ける領域が出現してしまい、プライベート空間全域を外来 BSS からの影響を受けない領域とすることはできない。なお、本稿では、プライベート空間内で外来 BSS の影響を受けない領域を保護領域と呼ぶ。

以上のように、仮想専用チャンネル構築法において、守衛端末の NAV フレーム送信電力は、

- (a) 空間内に形成される保護領域の場所と面積
- (b) 空間内外に存在する外来 BSS の伝送性能

を決定する重要なパラメータであり、NAV フレームの送信電力が及ぼす影響を明らかにするとともに、設計指針の確立は重要な課題である。

3. NAV 通知特性および割り込み特性の解析

前節で述べたように、守衛端末の NAV フレーム送信電力は、仮想専用チャンネル構築法の伝送性能を決定する重要なパラメータであり、仮想専用チャンネル構築法において、プライベート空間内にエリアオーナーが目標とする広さを持った保護領域を確保しつつ、空間外に存在する不特定多数の外来 BSS の伝送を過剰に阻害しないためには、守衛端末の NAV フレーム送信電力を十分に精査して設定する必要がある。本節では、仮想専用チャンネル構築法における守衛端末の NAV フレーム送信電力の設計指針の確立を目的として、仮想専用チャンネル構築法における媒体予約期間 (NAV) の通知特性、ならびに、NAV を傍受できなかった外来 BSS から送出される DATA フレームの割り込み特性の理論解析を行う。

3.1 解析モデル

本節で対象とする伝送空間モデルおよび MAC プロトコルを、それぞれ、図3および図4に示す。2次元直交座標系で表現される伝送空間に N 台の守衛端末 ($G\text{-STA}_n$, $1 \leq n \leq N$) がに配置されているものとし、 n 番目の守衛端末の座標を $(x_{G\text{-STA}_n}, y_{G\text{-STA}_n})$ とする。また、AP と端末の両方を所持する一人の外来者が伝送空間内の地点 $(x_{V\text{-BSS}}, y_{V\text{-BSS}})$ に静止して存在し、外来者が所持する AP と端末との間の距離は十分に短いものとする。

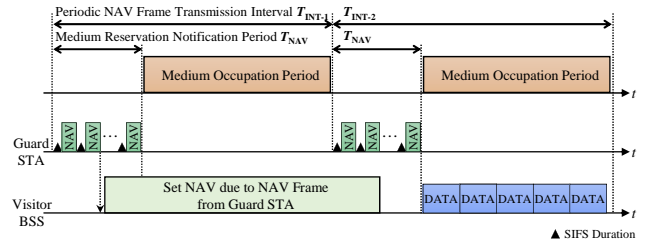


図4: 解析モデルの MAC プロトコル

図4の媒体予約周期 $T_{\text{INT}-1}$ の期間に示すように、外来 BSS が、媒体予約通知期間 T_{NAV} において各守衛端末から送出される N 個の NAV フレームのうち少なくとも1個の NAV フレームを誤りなく傍受した場合、次回の媒体予約通知期間まで送信待機状態になる。一方、図4の媒体予約周期 $T_{\text{INT}-2}$ の期間に示すように、外来 BSS が、媒体予約通知期間 T_{NAV} において各守衛端末から送出される N 個の NAV フレーム全てを傍受できなかった場合、外来 BSS は次回の媒体予約通知期間が開始されるまで、自身が保持する DATA フレームの送信を試みる。

解析の簡単化のため、本稿では、以下の (i)~(iii) に示す条件を仮定して解析を進める。

- (i) 媒体予約通知期間 T_{NAV} では、守衛端末からのみフレームが送出され、外来 BSS からフレームは送出されない。
- (ii) 外来 BSS は常に伝送すべき DATA フレームを送信バッファ内に保持している。守衛端末から送出される NAV フレームを全て傍受できなかった場合、媒体予約通知期間終了時点から次回の媒体予約通知期間開始時点までの期間 $T_{\text{INT}} - T_{\text{NAV}}$ に亘って、外来 BSS は DCF 方式に則ることなく連続して自身が保持する DATA フレームを送出する。
- (iii) 守衛端末から送出された NAV フレームが最小受信感度 $v_{th\text{-NAV}}$ 以上の受信電力で外来 BSS に受信された場合、当該 NAV フレームは誤りなく受信され、媒体予約期間を通知できたものとする。また、外来 BSS から送出された DATA フレームが最小受信感度 $v_{th\text{-DATA}}$ 以上の受信電力で観測された場合、当該地点において DATA フレームの割り込みが発生したものとする。

上記の仮定 (i) により、守衛端末から送出される NAV フレームと外来 BSS から送出される DATA フレームの衝突は発生しないものと扱うことができる。また、仮定 (ii) により、守衛端末から送出される NAV フレームを傍受できなかった場合、媒体予約周期 T_{INT} にて、外来 BSS から送出される DATA フレーム数 M は次式で表される。

$$M = \left\lfloor \frac{T_{\text{INT}} - T_{\text{NAV}}}{T_{\text{DATA}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{T_{\text{INT}} - T_{\text{NAV}}}{T_{\text{preamble}} + \left\lfloor \frac{D_{\text{SIZE}} \times 8}{R_{\text{DATA}}} \right\rfloor} \right\rfloor \quad (1)$$

ただし、上式において、関数 $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数を表す。また、 T_{DATA} , T_{preamble} , D_{SIZE} , R_{DATA} は、それぞれ、外来 BSS から送出される DATA フレームの時間長、プリアンブル時間量、データサイズ (Byte)、伝送速度 (ビット/秒) である。

3.2 NAV 通知特性の解析

本稿では、仮想専用チャネル構築法において、1回の媒体予約周期 T_{INT} にて、外来 BSS に対して媒体予約期間を誤りなく通知し、外来 BSS を送信待機状態とする確率を NAV 通知率と定義する。また、プライベート空間の面積に対する、プライベート空間外で所定の NAV 通知率を上回る面積の割合を空間外 NAV 通知面積率と定義する。以下では、前項 3.1 で示した解析モデルを基に NAV 通知率を導出する。

(a) NAV フレームの受信誤り率の導出

伝送空間内に配置された N 台の守衛端末のうち、 n 番目の守衛端末 $G\text{-STA}_n$ から送出される NAV フレームの送信電力 X_n が平均 $X_{n\text{-AVE}}$ 、標準偏差 σ_N の対数正規分布に従うものとする。このとき n 番目の守衛端末 $G\text{-STA}_n$ から送出される NAV フレームが誤って受信される確率 $P_{n\text{-NAV}}$ は、当該フレームの受信電力 X_n が最小受信感度 $v_{th\text{-NAV}}$ を下回る確率であり、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} P_{n\text{-NAV}} &= \text{Prob}(X_n < v_{th\text{-NAV}}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \int_{-\infty}^{v_{th\text{-NAV}}} \exp\left(-\frac{(X_n - X_{n\text{-AVE}})^2}{2\sigma_N^2}\right) dX_n \\ &= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{v_{th\text{-NAV}} - X_{n\text{-AVE}}}{\sqrt{2\sigma_N^2}}\right) \quad (1 \leq n \leq N) \end{aligned} \quad (2)$$

(b) NAV 通知率の導出

1回の媒体予約周期にて媒体予約期間を外来 BSS に通知するためには、媒体予約通知期間に守衛端末から送出される N 個の NAV フレームのうち、少なくとも1個の NAV フレームを外来 BSS によって誤りなく受信される必要がある。各守衛端末から送出される NAV フレームの受信電力の変動は統計的に独立であるとすると、 N 個全ての NAV フレームが誤って受信される確率は、式 (2) を用いて $\prod_{n=1}^N P_{n\text{-NAV}}$ として与えられる。したがって、媒体予約通知期間に守衛端末から送出される N 個の NAV フレームのうち、1個以上の NAV フレームが誤りなく受信される確率、すなわち、NAV 通知率 P_{NAV} は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} P_{\text{NAV}} &= 1 - \prod_{n=1}^N P_{n\text{-NAV}} \\ &= 1 - \prod_{n=1}^N \left(1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{v_{th\text{-NAV}} - (P_{T\text{-NAV}} - \Lambda(d_n))}{\sqrt{2\sigma_N^2}}\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

上式において $P_{T\text{-NAV}}$ は守衛端末の NAV フレーム送信電力である。また、 $\Lambda(d_n)$ は n 番目の守衛端末と外来 BSS との間の距離 d_n に起因する伝搬損失 (dB 表記) であり、本稿では、外来 BSS の位置 $(x_{V\text{-BSS}}, y_{V\text{-BSS}})$ 、および、 n 番目の守衛端末の位置 $(x_{G\text{-STA}_n}, y_{G\text{-STA}_n})$ を用いて次式で与えられるものとする。

$$\Lambda(d_n) = 39.7 + 30 \times \log_{10}(d_n)$$

$$= 39.7 + 30$$

$$\times \log_{10} \sqrt{(x_{V\text{-BSS}} - x_{G\text{-STA}_n})^2 + (y_{V\text{-BSS}} - y_{G\text{-STA}_n})^2} \quad (1 \leq n \leq N) \quad (4)$$

3.3 外来 BSS からの割り込み特性の理論解析

(a) 外来 BSS のフレーム割り込みに関する用語の定義

仮想専用チャネル構築法において、1回の媒体予約周期 T_{INT} にて、外来 BSS に対し NAV フレームを全く通知することができなかった場合、外来 BSS は、当該媒体予約周期内の媒体予約通知期間終了後、 $T_{\text{INT}} - T_{\text{NAV}}$ 期間において自身が保持する DATA フレームの伝送を試みる。

本稿では、1回の媒体予約周期 T_{INT} にて、媒体予約期間が通知されなかった外来 BSS が送出した M 個の DATA フレームのうち、1個以上の DATA フレームが最小受信感度 $v_{th\text{-DATA}}$ 以上の電力で受信される事象をフレーム割り込みと呼び、その生起確率をフレーム割り込み発生確率と呼ぶ。

また、1回の媒体予約周期 T_{INT} にて、外来 BSS が送出した M 個の DATA フレームのうち最小受信感度 $v_{th\text{-DATA}}$ 以上の電力で受信された DATA フレームの個数の平均値を平均割り込みフレーム数と呼び、媒体予約期間が通知されなかった外来 BSS が送出した DATA フレーム数 (M) に対する割り込みフレーム数の割合の平均値を平均割り込みフレーム率と呼ぶ。

さらに、エリアオーナーが所望する平均割り込みフレーム率を所望平均割り込みフレーム率と呼び、プライベート空間で所望平均割り込みフレーム率以下を達成できる領域を保護領域、プライベート空間全面積に対する保護領域の面積の割合を保護領域面積率と定義する。

(b) フレーム割り込み発生確率の導出

まず、外来 BSS から送出された m 番目の DATA フレームが座標 $(x_{\text{obsv}}, y_{\text{obsv}})$ にある観測点 P で受信される電力を考える。外来 BSS から送出される DATA フレームの受信電力 X_m が、平均 $X_{m\text{-AVE}}$ 、標準偏差 σ_M の対数正規分布に従うとすると、観測点 P において当該 DATA フレームの受信電力 X_m が最小受信感度 $v_{th\text{-DATA}}$ を下回る確率 $P_{m\text{-DATA}}$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned} P_{m\text{-DATA}} &= \text{Prob}(X_m < v_{th\text{-DATA}}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_M^2}} \int_{-\infty}^{v_{th\text{-DATA}}} \exp\left(-\frac{(X_m - X_{m\text{-AVE}})^2}{2\sigma_M^2}\right) dX_m \\ &= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{v_{th\text{-DATA}} - X_{m\text{-AVE}}}{\sqrt{2\sigma_M^2}}\right) \quad (1 \leq m \leq M) \end{aligned} \quad (5)$$

外来 BSS から送出される M 個の DATA フレームの受信電力の変動は統計的に独立であるとすると、観測点 P において、 M 個全ての DATA フレームが最小受信感度 $v_{th\text{-DATA}}$ を下回る電力で受信される確率は、式 (5) で求めた $P_{m\text{-DATA}}$ を用いて $\prod_{m=1}^M P_{m\text{-DATA}}$ として与えられる。したがって、媒体予約通知期間終了後に外来 BSS から送出される M 個の DATA フレームのうち、1個以上の DATA

フレームが観測点 P において最小受信感度 $v_{th-DATA}$ 以上で観測される確率, すなわち, 観測点 P でのフレーム割り込み発生確率は次式のように求められる.

$$P_{DATA} = 1 - \prod_{m=1}^M P_{m-DATA}$$

$$= 1 - \prod_{m=1}^M \left(1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{v_{th-DATA} - (P_{T-DATA} - \Lambda(d))}{\sqrt{2\sigma_M^2}} \right) \right) \quad (6)$$

上式において P_{T-DATA} は外来 BSS から送出された DATA フレームの送信電力である. また, $\Lambda(d)$ は外来 BSS と観測地点 P との間の距離 d に起因する伝搬損失である. 式 (4) と同様に, 本稿では, 伝搬損失 $\Lambda(d)$ は外来 BSS の位置 (x_{V-BSS}, y_{V-BSS}) , および, 観測地点 P の位置 (x_{obsv}, y_{obsv}) を用いて次式で与えられるものとする.

$$\Lambda(d) = 39.7 + 30 \times \log_{10}(d)$$

$$= 39.7 + 30$$

$$\times \log_{10} \sqrt{(x_{V-BSS} - x_{obsv})^2 + (y_{V-BSS} - y_{obsv})^2} \quad (7)$$

(c) 平均割り込みフレーム率の導出

式 (5) で求めた, P_{m-DATA} を用いると, 外来 BSS から送出される M 個の DATA フレームのうち, k 個の DATA フレームが, 観測点 P において最小受信感度 $v_{th-DATA}$ 以上で観測される確率, すなわち, 観測点 P で k 個の DATA フレームの割り込みが発生する確率 $P_{(DATA=k)}$ は次式のように求められる.

$$P_{(DATA=k)} = {}_M C_k (1 - P_{m-DATA})^k P_{m-DATA}^{M-k} \quad (8)$$

また, 外来 BSS から送出される M 個の DATA フレームのうち, 観測点 P において最小受信感度 $v_{th-DATA}$ 以上で観測される DATA フレーム数の平均値, すなわち, 観測点 P での平均割り込みフレーム数 N_{DATA} は次式のように求められる.

$$N_{DATA} = \sum_{k=0}^M k \cdot P_{(DATA=k)}$$

$$= \sum_{k=0}^M k \cdot {}_M C_k (1 - P_{m-DATA})^k P_{m-DATA}^{M-k} \quad (9)$$

平均割り込みフレーム率は, 外来 BSS が送出した DATA フレーム数 M に対する平均割り込みフレーム数 N_{DATA} の割合であるので, 平均割り込みフレーム率 $R_{DATA-frame}$ は, 式 (9) で与えられる N_{DATA} を用いて以下のように表される.

$$R_{DATA-frame} = \frac{N_{DATA}}{M}$$

$$= \frac{\sum_{k=0}^M k \cdot {}_M C_k (1 - P_{m-DATA})^k P_{m-DATA}^{M-k}}{M} \quad (10)$$

表 1: 特性評価に用いた主な諸元

Carrier frequency	2.4 GHz
Channel bandwidth	20 MHz
Tx. scheme	IEEE 802.11 OFDM
Number of Guard STAs	25 (= N)
Number of Visitor BSS	1
Number of NAV frames	$N = 25$
Number of DATA frames	$M = 114$
MCS for NAV frame	BPSK ($R = 1/2$)
MCS for DATA frame	16QAM ($R = 3/4$)
Tx. rate for NAV frame	$R_{NAV} = 6$ Mbps
Tx. rate for DATA frame	$R_{DATA} = 54$ Mbps
Tx. power of NAV frame	$P_{T-NAV} = -\infty, -30 \sim 10$ dBm
Tx. power of DATA frame	$P_{T-DATA} = 10$ dBm
Size of NAV frame	$D_{NAV} = 14$ Oct.
Size of DATA frame	$D_{DATA} = 1500$ Oct.
Duration of T_{INT}	30 ms.
Duration of T_{NAV}	60 μ s.
Duration of T_{DATA}	248 μ s.
Required Rx. sensitivity	$v_{th-NAV} = v_{th-DATA} = -82$ dBm
PSD of white noise	$(-173.83 + NF)$ dBm/Hz
Path loss model	Indoor path loss model in ITU-R P.1238 [8]
Shadowing model	Log-normal shadowing ($\sigma_N = \sigma_M = 5$ dB)

(d) NAV 通知率を考慮した平均割り込みフレーム率

上記 (a)~(c) では, 媒体予約通知期間 T_{NAV} にて外来 BSS が NAV フレームを全く受信できなかった条件下での, 座標 (x_{obsv}, y_{obsv}) の観測点 P における

- フレーム割り込み発生確率 P_{DATA} (式 (6))
- 平均割り込みフレーム数 N_{DATA} (式 (9))
- 平均割り込みフレーム率 $R_{DATA-frame}$ (式 (10))

を導出した.

媒体予約通知期間 T_{NAV} にて外来 BSS が NAV フレームを全く受信できない事象の発生確率は, 式 (3) で求めた NAV 通知率 P_{NAV} を用いて, $1 - P_{NAV}$ で与えられる. したがって, 守衛端末からの NAV 通知率の成否確率も含めた, フレーム割り込み発生率 P_{DATA} , 平均割り込みフレーム数 N_{DATA} , 平均割り込みフレーム率 $R_{DATA-frame}$ は, それぞれ, 以下のように表される.

$$\overline{P_{DATA}} = (1 - P_{NAV}) P_{DATA} \quad (11)$$

$$\overline{N_{DATA}} = (1 - P_{NAV}) N_{DATA} \quad (12)$$

$$\overline{R_{DATA-frame}} = (1 - P_{NAV}) R_{DATA-frame} \quad (13)$$

4. 特性評価

4.1 評価諸元

仮想専用チャネル構築法において, プライベート空間に分散配置された守衛端末から送出された NAV フレームの通知特性ならびに外来 BSS からの割り込み特性について, 前節で述べた理論式を用いて理論解析および評価を行う. 特性評価に用いた主な諸元を表 1 に示す.

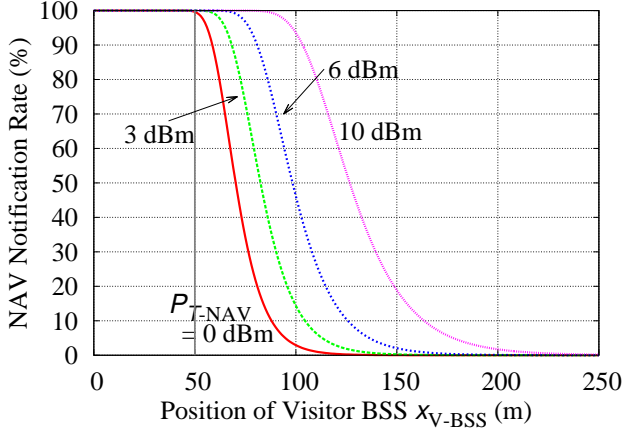


図 5: 外来 BSS の位置と NAV 通知率

プライベート空間として、2次元直交座標系の原点 $(0\text{ m}, 0\text{ m})$ を中心とする一辺 L_{Priv} (m) の正方形の領域を考え、原点を中心とする一辺 $L_{\text{G-STA}}$ (m) の正方形の領域内に $N = 25$ 台の守衛端末 ($\text{G-STA}_n, 1 \leq n \leq 25$) が均等に配置されるものとする。また、プライベート空間内外の一辺 $L_{\text{V-BSS}}$ (m) の正方形の領域を考え、その領域内の座標 $(x_{\text{V-BSS}}, y_{\text{V-BSS}})$ の地点に一つの外来 BSS が静止して存在するものとする。

一般に、エリアオーナーが設置する守衛端末はプライベート空間の領域内部にのみ設置可能であると考えられることから、 $L_{\text{G-STA}} \leq L_{\text{Priv}} \leq L_{\text{V-BSS}}$ の関係にある。以降の特性評価では、比較的広域なプライベート空間を想定し、 $L_{\text{G-STA}} = L_{\text{Priv}} = 100\text{ m}$ とする。一方、外来 BSS はプライベート空間内外の様々な地点に出現し得ると考えられるため、外来 BSS が存在し得る領域や観測地点とする領域を限定することはできないが、本稿では、プライベート空間でフレーム割り込みが発生する確率が十分に小さいと見なせる範囲として、 $L_{\text{V-BSS}} = 700\text{ m}$ とする。 $(-350\text{ m} \leq x \leq 350\text{ m}, -350\text{ m} \leq y \leq 350\text{ m})$ の領域内に外来 BSS が存在する地点および観測地点を設けることとする。

4.2 NAV 通知特性の評価

まず、前節で導出した式 (3) に基づき、守衛端末の NAV フレーム送信電力が $P_{\text{T-NAV}} = 0, 3, 6, 10\text{ dBm}$ の場合を対象として、座標 $(x_{\text{V-BSS}}, 0)$ (ただし $0\text{ m} \leq x_{\text{V-BSS}} \leq 250\text{ m}$) に存在する外来 BSS への NAV 通知率を求めた結果を図 5 に示す。また、同様に、座標 $(x_{\text{V-BSS}}, y_{\text{V-BSS}})$ (ただし $-150\text{ m} \leq x_{\text{V-BSS}} \leq 150\text{ m}, -150\text{ m} \leq y_{\text{V-BSS}} \leq 150\text{ m}$) に存在する外来 BSS への NAV 通知率を求めた結果を 2次元カラーマップとして図 6 に示す。なお、図 5 において $x_{\text{V-BSS}} = 50\text{ m}$ にある黒色直線、および、図 6 の黒色四角枠はプライベート空間の境界を表している。

両図より、守衛端末の NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}}$ の増大に伴い、より広範囲かつ高い確率で媒体予約期間を通知できることがわかる。具体的には、図 5 において NAV 通知率 $P_{\text{NAV}} \geq 80\%$ を満足する外来 BSS の位置に着目すると、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 0\text{ dBm}$ の場合は、外来 BSS が $x_{\text{V-BSS}} \leq 60\text{ m}$ 程度の領域に位置するときに満足するのに対し、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 10\text{ dBm}$ の場合には、 $x_{\text{V-BSS}} \leq 115\text{ m}$ 程度の広範

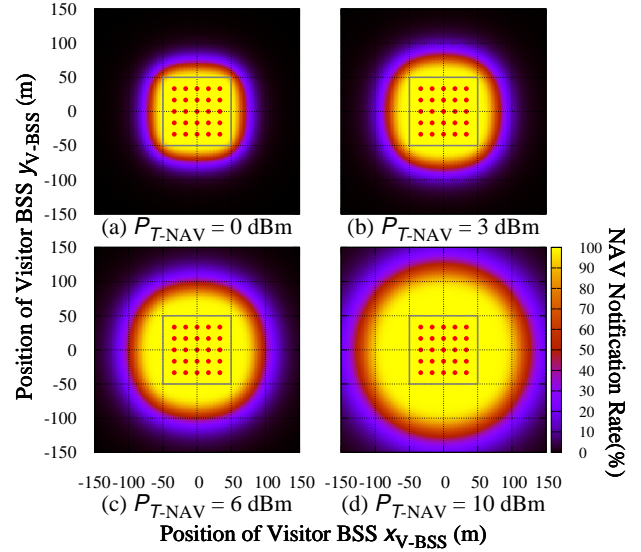


図 6: 外来 BSS の位置と NAV 通知率 (カラーマップ)

囲な領域で満足している。同様に、 $x_{\text{V-BSS}} = 100\text{ m}$ に位置する外来 BSS への NAV 通知率 P_{NAV} を見ると、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 0\text{ dBm}$ の場合は、NAV 通知率 $P_{\text{NAV}} = 3\%$ 程度に留まり、外来 BSS からの DATA フレームの送出をほとんど抑制できていない。一方、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 10\text{ dBm}$ の場合は、NAV 通知率 $P_{\text{NAV}} \geq 90\%$ を達成し、外来 BSS からの DATA フレームの送出をほぼ完全に抑止している。

4.3 平均割り込みフレーム率の評価

図 5 および図 6 に示したように、守衛端末の NAV フレーム送信電力を増大することで、より広範囲かつ高い確率で外来 BSS に対して媒体占有期間を通知できることから、プライベート空間内のより広い範囲で外来 BSS からの割り込みを低減させるという目的に対しては、NAV フレーム送信電力の増大は有効な手段である。

しかしながら、一方、外来 BSS を主体として考えると、NAV 通知率は自身の伝送が阻害される割合 (時間率) であり、NAV フレーム送信電力の増大による NAV 通知率の向上は、同時に、より広範囲かつ高い確率で自身の伝送が妨げられてしまうことを意味している。先の例を用いると、 $x_{\text{V-BSS}} = 100\text{ m}$ に存在する外来 BSS の場合、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 0\text{ dBm}$ の場合は 3% 程度の時間率で自身の伝送が阻害されるのに対し、NAV フレーム送信電力 $P_{\text{T-NAV}} = 10\text{ dBm}$ の場合は 90% 以上の時間率で自身の伝送が阻害されてしまうこととなる。ここでは、守衛端末の NAV フレーム送信電力が $P_{\text{T-NAV}} = -\infty, 0, 3, 6, 10\text{ dBm}$ の 5 つの場合を対象として、座標 $(x_{\text{V-BSS}}, 0)$ に存在する外来 BSS の DATA フレームの伝送が抑制される時間率、ならびに、抑制されなかった DATA フレームがプライベート空間に及ぼす影響について検討する。

前節で導出した式 (10) および式 (13) に基づき、外来 BSS が座標 $(x_{\text{V-BSS}}, 0)$ (ただし $x_{\text{V-BSS}} = 45, 55, 100, 150\text{ m}$) に存在する場合の、観測地点 $(x_{\text{obsv}}, 0)$ (ただし $0\text{ m} \leq x_{\text{obsv}} \leq 350\text{ m}$) での平均割り込みフレーム率を求めた結果を図 7(a)~(d) に示す。

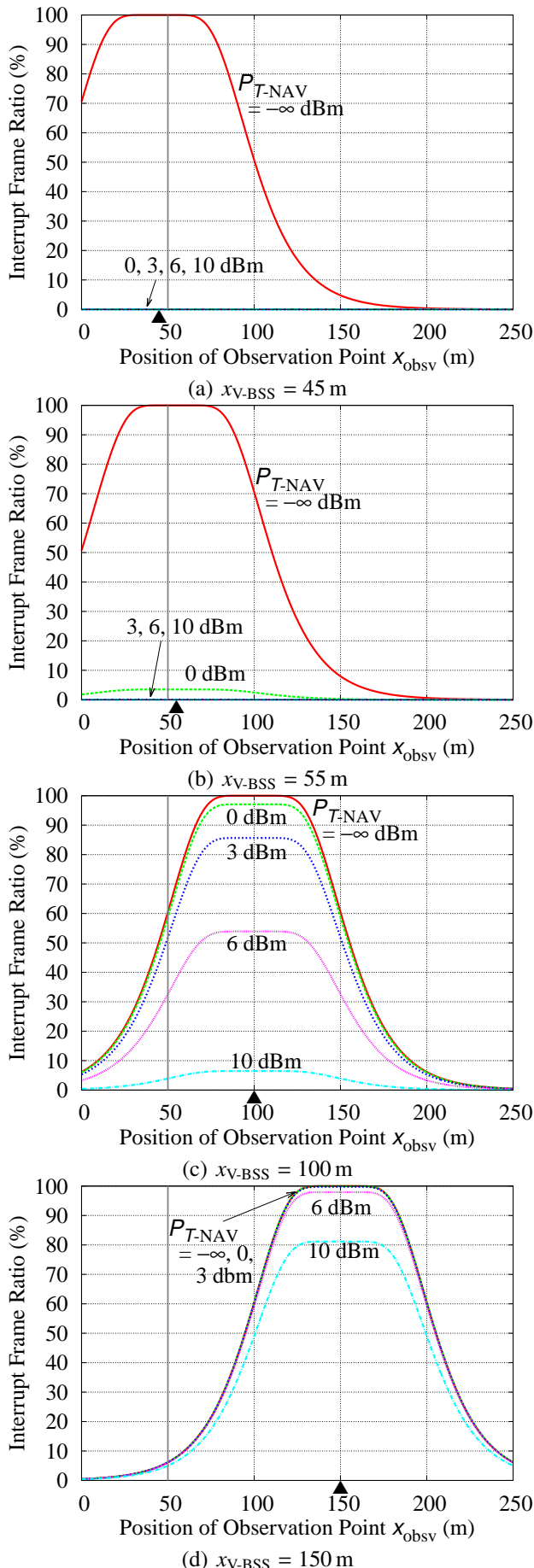


図7: 観測点と平均フレーム割り込み率の関係

図7(a)~(d)は、それぞれ、外来BSSが、

- (a) プライベート空間内 (境界から5m内側)
- (b) プライベート空間外近傍 (境界から5m外側)
- (c) プライベート空間外遠方 (境界から50m外側)
- (d) プライベート空間外遠方 (境界から100m外側)

に存在する場合に相当し、各図の横軸黒色▲記号は外来BSSの存在地点を示している。

各図において、各守衛端末のNAVフレーム送信電力を $P_{T-NAV} = -\infty, 0, 3, 6, 10$ dBm の5種類とし、外来BSSのDATAフレーム送信電力を $P_{T-DATA} = 10$ dBm としている。なお、NAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} = -\infty$ dBm は、守衛端末からNAVフレームを送出しない場合に相当する。この場合、外来BSSに対して媒体予約期間が通知されないため、外来BSSは M 個のDATAフレームを連続して送出することになる。

まず、図7(a)~(d)全てにおいて、守衛端末のNAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} = -\infty$ dBm の場合を見ると、外来BSSが存在する地点(黒色▲記号の地点)の近傍の観測地点では、平均割り込みフレーム率はほぼ100%となっている。これは、NAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} = -\infty$ dBm の場合は、守衛端末から媒体予約期間が通知されないため、媒体予約通知期間終了後、外来BSSは M 個のDATAフレームを連続して送出し、外来BSSの近傍の観測地点ではそれら送出されたDATAフレームは全て最小受信感度 $v_{th-DATA}$ 以上の電力で受信されるためである。また、観測地点が外来BSSが存在する地点から離れるに従い、外来BSSから送出されたDATAフレームの受信電力が最小受信感度 $v_{th-DATA}$ を下回る確率が高まるため、平均割り込みフレーム率が低下していることを確認できる。

次に、図7(a)に示す外来BSSがプライベート空間内に存在する場合を見ると、NAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} = -\infty$ dBm ではプライベート空間内(すなわち $x_{obsv} \leq 50$ m の領域)において70%~100%の高い割り込みフレーム率であったのに対し、NAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} \geq 0$ dBm ではフレーム割り込み率はほぼ0%になっている。これは、図5に示すように、NAVフレーム送信電力 $P_{T-NAV} \geq 0$ dBm の場合、NAV通知率 $P_{NAV} = 100\%$ となり、外来BSSからのDATAフレームの送出が完全に抑制されるためである。

また、図7(b)および図7(c)に示す外来BSSがプライベート空間外に存在する場合を見ると、NAVフレーム送信電力 P_{T-NAV} が低い場合は、プライベート空間内である $x_{obsv} \leq 50$ m の領域においてフレーム割り込みが発生していることを確認できる。これは、図5に示すように、NAVフレーム送信電力 P_{T-NAV} が低い場合、プライベート空間外に存在する外来BSSへのNAV通知率 P_{NAV} が100%を下回り、守衛端末から外来BSSに対して媒体予約期間を確実に通知することができなくなるためである。同じNAVフレーム送信電力 P_{T-NAV} で図7(b)と図7(c)を比較すると、外来BSSがプライベート空間から離れるに従い、外来BSSへのNAV通知率 P_{NAV} が低下するため、外来BSSからのDATAフレームの送出を抑制することはできず、その分、プライベート空間内での ($x_{obsv} \leq 50$ m の領域での) フレーム割り込み率が高まることを確認できる。

一方、図7(d)に示す外来BSSがプライベート空間からかなり離れて存在する場合、NAVフレーム送信電力

$P_{T-NAV} = 10 \text{ dBm}$ と高く設定しても、図 5 からわかるように外来 BSS へ NAV 通知率 P_{NAV} は 20% 程度に留まるため、外来 BSS からの DATA フレームの送出を抑制できないものの、プライベート空間内である $x_{obsv} \leq 50 \text{ m}$ の領域では、フレーム割り込みはさほど発生していないことを確認できる。これは、図 7(d) のように外来 BSS がプライベート空間から十分に離れて存在する状況では、外来 BSS からの DATA フレームの送出を抑制しなくても、プライベート空間内の DATA フレームの受信電力が最小受信感度 $v_{th-DATA}$ を下回る確率が高くなるためである。もちろん、このように外来 BSS がプライベート空間から十分に離れている状況でも、NAV フレームの送信電力をさらに高めることで外来 BSS からの DATA フレームの送出を抑止できる。しかしながら、図 7(d) の NAV フレーム送信電力 $P_{T-NAV} = -\infty \text{ dBm}$ の場合の特性からわかるように、媒体予約期間を通知しなくても、外来 BSS から送出された DATA フレームがプライベート空間に割り込む確率は低いため、NAV フレームの送信電力の過剰な増大は外来 BSS の伝送を必要以上に阻害するという弊害をもたらすものと考えられる。

4.4 NAV 送信電力の設計例

4.2 および 4.3 で示したように、NAV フレーム送信電力を高めることで、より広範囲かつ高い確率で外来 BSS の伝送を抑止できるものの、NAV フレーム送信電力の過剰な増大は外来 BSS の伝送を必要以上に阻害してしまう。ここでは、仮想専用チャンネル構築法の設計例として、目標とする保護領域面積率を達成するための NAV フレーム送信電力（所要 NAV フレーム送信電力）と空間外 NAV 通知面積率の数値例を示す。

NAV フレーム送信電力 P_{T-NAV} と保護領域面積率ならびに空間外 NAV 通知面積率の関係性を評価した結果を図 8 に示す。

図 8 より、NAV フレーム送信電力を高めることで、プライベート空間内の保護領域の面積率を向上できる一方、空間外 NAV 通知面積率も増大し広範囲な領域に亘って外来 BSS の伝送を阻害していることがわかる。プライベート空間外の境界近傍である座標 (55 m, 0 m) に外来 BSS が存在する場合を対象として具体的な数値例を考えると、目標とする保護領域面積率を 90% としたとき、NAV フレームの所要送信電力は -5 dBm 程度であり、そのときの空間外 NAV 通知面積率は 90% 程度となる。それに対し、目標とする保護領域面積率を 30% まで下げると、NAV フレームの所要送信電力を -8 dBm 程度に低減でき、空間外 NAV 通知面積率も 20% 程度まで低下し、外来 BSS の伝送が妨げられる時間率を低減できる。以上のように、本稿で示した理論解析は、目標とする保護領域面積率と空間外 NAV 通知面積率とのトレードオフを容易に明らかできることから、仮想専用チャンネル構築法の設計に際して有用であるといえる。

5. まとめ

本稿では、守衛端末からの NAV フレーム送信電力の設計指針の確率を目的として、NAV フレーム送信電力と保護領域の面積ならびに外来 BSS の伝送性能に及ぼす影響を理論的に解析した。また、ぐらい適業要求条件に基づく NAV フレーム送信電力の設計事例を取り上げ、本稿で示した理論解析は、目標とする保護領域面積率と

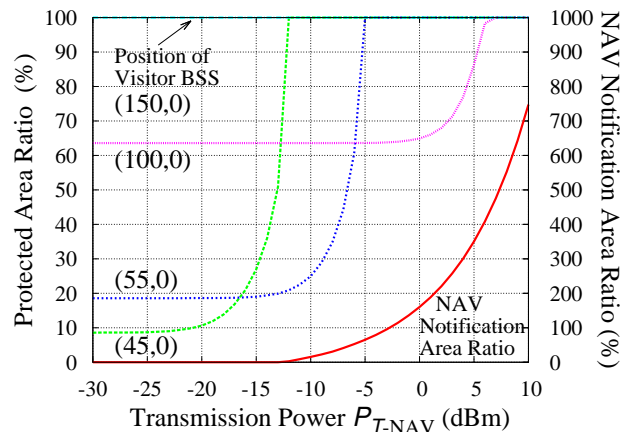


図 8: 空間内保護面積率および空間外 NAV 通知面積率
空間外 NAV 通知面積率とのトレードオフの関係性を容易に明らかにするものであり、仮想専用チャンネル構築法の設計において有用なものであることを示した。

参考文献

- [1] IEEE Std. 802.11-2016, Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 2016.
- [2] M. Van der Schaar, Y. Andreopoulos, Z. Hu, "Optimized Scalable Video Streaming over IEEE 802.11 a/e HCCA Wireless Networks under Delay Constraints," IEEE Trans. on Mobile Computing, vol. 5, pp. 755-768, June., 2006.
- [3] S. Miyamoto, S. Sampei, W. Jiang, "Novel DCF-based Multi-User MAC Protocol for Centralized Radio Resource Management in OFDMA WLAN Systems," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 9, pp. 2301-2312, Sept., 2013.
- [4] Y. P. Fallah, S. Khan, P. Nasiopoulos, H. Alnuweiri, "Hybrid OFDMA/CSMA Based Medium Access Control for Next-Generation Wireless LANs," Proc. of IEEE ICC 2008, pp. 2762-2768, May., 2008.
- [5] 延堂拓也, 宮本伸一, 三瓶政一, 姜聞杰, "集中制御型無線 LAN システムにおける BSS 間協調リソースマネジメントの提案," 信学技報, RCS2014-264, pp. 259-264, Dec., 2014.
- [6] 大前篤史, 宮本伸一, 三瓶政一, "無線 LAN システムにおける仮想専用チャンネル構築のための分散配置された端末からの巡回 NAV 通知に関する一検討," 2015 信学総大, B-5-146, Mar., 2015.
- [7] 中沢雄介, 宮本伸一, "プライベート空間において運用される無線 LAN 保護のための媒体予約方式に関する一検討," 信学技報, SR2016-65, pp. 53-58, Oct., 2016.
- [8] Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, Recommendation ITU-R M. 1225, 1997.