

太陽エネルギーを利用した無線センサネットワークのための 発電量予測を用いた中継ノード選択手法

太田健太郎^{†1} 小林健太郎^{†2}
山里敬也^{†3} 片山正昭^{†2}

太陽エネルギーを利用した無線センサネットワークをエネルギー利用の効率化によって天候、昼夜によらず常に高いパケット伝送率で運用することを目指している。ネットワーク全体の消費エネルギーを最適化する方法として、データ送信時にノードがデータの中継を行う協力伝送方式がある。しかし、発電量の変動を考慮しない場合、曇天時や夜間にノードの電池切れによってパケット伝送率が低下してしまう。本稿では、発電量予測を利用した中継ノード選択手法を提案し、天候変化の影響を軽減することで、要求される高いパケット伝送率の維持を図る。

Relay Selection Scheme with Harvested Solar Energy Prediction for Solar-Powered Wireless Sensor Networks

KENTARO OTA,^{†1} KENTARO KOBAYASHI,^{†2}
TAKAYA YAMAZATO^{†3} and MASAAKI KATAYAMA^{†2}

Our goal is to make efficient use of the energy and therefore achieve network operation with a high packet delivery ratio, regardless of day, night and weather variations, in solar powered wireless sensor networks. One method to optimize the consumption energy in the entire network is to employ a cooperative transmission scheme in which a node uses another node as a relay, when sending its data. If we do not consider the changes in the harvested energy in the network, the packet delivery ratio declines during nights and cloudy days. In this paper, however, we propose a new relay selection scheme with harvested solar energy prediction to maintain the required high packet delivery ratio by reducing the effect of the weather variations.

1. はじめに

大気汚染などの環境情報、橋梁などの建造物の耐久度等、長期間にわたる継続観測に対する需要がある。これらの実現手段として、無線通信機能を持つ小型端末（センサノード）を多数配置し、観測した情報を無線通信によってBS（ベースステーション）へ送ることで広範囲の情報を取得する無線センサネットワークが注目されている。

センサノードは自由に設置できることが求められるため、配線の必要がない電池駆動が一般的である。しかし、電池のみではノードの稼働時間に限界があり、対象の長期観測が行えない。ノードの長期稼働方法として、発電素子と蓄電池を用いた環境エネルギーの利用がある [1–3]。本稿では、建造物の耐久度監視などの屋外での用途を想定する。屋外で利用可能な環境エネルギーの中でも面積あたりの発電量が大きい太陽エネルギーの利用を考える。

しかし、環境エネルギーを利用する環境下でも、電池切れによってノードが停止することがある。その要因の一つとしてデータの再送による消費エネルギーの増加がある。伝送に失敗したノードが同一のデータを再送する場合、BS から遠方のノードほど伝送誤り率が高く、再送回数が増加してしまう。これにより、BS から遠方の一部のノードの消費エネルギーが大きくなり、早期に停止する。ノードの早期停止によって、ネットワーク全体のパケット伝送率が低下してしまう。

この問題に対して協力伝送の適用を考える。協力伝送ではBS から遠いノードのデータ伝送に他のノードを中継ノードとして利用することで送信ノードの再送回数を低減でき、全ノードの電池残量の均一化が可能になる。環境エネルギーを利用する環境下での協力伝送手法としていくつかの先行研究がある [4–6]。文献 [4] では送信ノードと目標ノードとの中間点に中継ノードを配置することで、再送によるデータ伝送の遅延時間が削減されスループットが向上することが示されている。文献 [5] ではノードが多数存在する場合に、各ノードの電池残量と消費エネルギーの期待値からBS が中継ノードを選択する方法が提案されている。しかし、文献 [5] ではノードの充電が常に充分に行われる理想的な環境を想定しており、伝送開始時に各ノードの電池残量は一定としている。文献 [6] では発電量がランダムに

^{†1} 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻

Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{†2} 名古屋大学エコトピア科学研究所

EcoTopia Science Institute, Nagoya University

^{†3} 名古屋大学教養教育院

Institute of Liberal Arts & Sciences, Nagoya University

変動する環境を想定しているが、ノードの電池残量の情報はそのノードが中継ノードの候補になるかどうかの判断のみに用いられており、中継ノードは伝送誤り率のみを基に選択されている。

太陽エネルギーを利用する場合、ランダムではなく、昼夜、天候による周期的な取得エネルギーの変動を考慮しなくてはならない。夜間、曇天時では、取得エネルギーが減少するため、ノードの電池切れが起こりやすくパケット伝送率が低下する。対象を常時観測し、定期的に情報を定期的に伝送するセンサネットワークでは、取得エネルギーの大小に関わらず常に高いパケット伝送率を達成することが求められる。このためには、データ伝送方法、ノードの運用方法の両面から取得エネルギーの変動の影響を軽減する工夫が必要である。

著者らはこれまで、太陽エネルギーを利用する環境下での協力伝送において、昼夜の取得エネルギーの変動に注目し、1度停止したノードに一定の充電期間を設けるノードの運用手法を提案してきた [7]。文献 [7] の手法により、夜間においても高い平均パケット伝送率を維持することが可能になった。本稿では、天候変化による平均パケット伝送率の低下を改善するために、発電量予測を利用した中継ノード選択方法を提案する。

2. システムモデル

2.1 想定環境

本稿では文献 [5] と同様に図 1 のように全ノードが BS の電波到達範囲内に配置され、その範囲内を観測領域とするシステムを考える。各ノードは BS からの信号は必ず受信に成功するとし、BS は全ノードの位置を把握しているとする。BS によって全ノードの送受信はスケジューリングされ、衝突は起きない。また、各ノードはデータの採取、伝送は一定時間 (ラウンド) 毎に行い、それ以外の期間はノードはスリープ状態をとり、エネルギーを消費しないとする。

2.2 非協力伝送

非協力伝送では各ノードは取得したデータを単独で BS に伝送する。データ伝送が成功した場合は BS は ACK(肯定応答) をノードへ返信しデータ伝送サイクルを終了する。データ伝送に失敗した場合はノードは一定時間後に同一のデータを BS へ再送し、ACK が返信されるか、送信回数が送信上限回数 N_i に達するまで再送を繰り返す。送信上限回数 N_i は次式を満たす最小の n である。

$$(P_{(i,BS)})^n < P_a \quad (1)$$

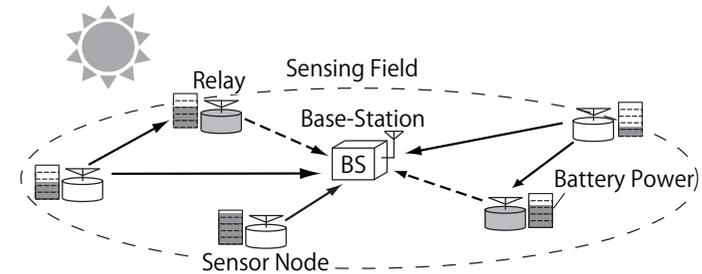


図 1 システムモデル
 Fig.1 System model.

$P_{(i,BS)}$ は送信ノード i から BS への伝送誤り率、 n は送信回数であり、 P_a は許容する誤り率である。

2.3 協力伝送

協力伝送では、図 1 に示すように各ノードは自身のデータを送信する送信ノードと、他のノードのデータを中継して BS へ送信する中継ノードの役割を持つ。送信ノードのデータは以下の手順に従って BS に伝送される。

- 1) BS が各ノードについて中継ノードを選択しルーティング情報をブロードキャスト。
- 2) 送信ノードが取得したデータを中継ノードと BS に送信。
- 3) a) BS が送信ノードから直接送られたデータの受信に成功した場合：
 BS は送信ノード、中継ノードに ACK を返信して伝送サイクルを終了。
 b) BS は送信ノードから送られたデータの受信に失敗したが、中継ノードは受信に成功した場合：
 中継ノードが送信ノードのデータを BS に送信。中継ノードから送られたデータを BS が受信できれば BS は送信ノード、中継ノードに ACK を返信して伝送サイクルを終了。中継ノードから送られたデータを BS が受信できなければ、一定時間後に送信ノードが同一のデータを再送。ただし、送信回数が上限 N_i に達していた場合は再送せず伝送失敗として伝送サイクルを終了。
 c) 送信ノードから送られたデータの受信に中継ノード、BS が共に失敗した場合：
 送信ノードが一定時間後に同一のデータを再送。送信回数が上限 N_i に達していた場合は再送せず伝送サイクルを終了。

非協力伝送ではデータの再送を行う場合、BS から遠方のノードほど再送回数が増加してしまう。協力伝送では上記のように中継ノードを利用することで BS から遠方のノードの再送

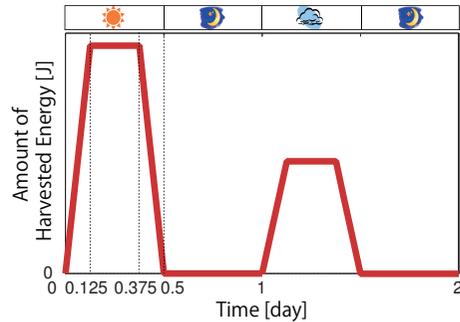


図 2 発電量の変化
 Fig. 2 Variations of harvested energy.

回数を低減し、エネルギー消費を軽減できる。

なお、中継ノードの利用によって送信ノードの再送が増加することはない。送信ノードは中継ノードと BS に個別にデータを送信するわけではなく、1度の送信で中継ノード、BS の両方にデータを送信する。BS へのみデータを伝送する非協力伝送に対して、協力伝送では、中継ノードによる中継が加わるが、送信ノードの再送回数は増加しない。中継ノードに関しては、自身のデータ伝送に加え他のノードのデータを中継するため、再送回数は増加する可能性がある。

3. 発電量予測を利用した中継ノード選択手法

本研究で想定する協力伝送では、送信ノードのデータ伝送に中継ノードを用いる。1つの送信ノードに対して複数のノードが中継ノード候補となる場合、中継ノードを選択する方法が必要である。文献 [5] では、中継ノードの選択基準値としてノードの電池残量と消費エネルギーの期待値の比を用いる手法が提案されている。本研究では、天候の変化による取得エネルギーの変動に対応するためにノードの電池残量、消費エネルギーの期待値に加え、予測発電量に基づいた中継ノード選択手法を提案する。

3.1 天候モデル

本稿では、太陽光発電は昼夜、天候の違い及び時間による発電量の変化を考慮する。発電量は図 2 に示すように昼夜及び、時間の変化によって変動するとする。想定する天候は、晴天、曇天の 2 つとし、晴天時の発電量は曇天時の 2 倍とする。天候は 1 日毎に決定され、同日中での天候の変化は起こらない。天候の変化はマルコフ過程に従うとする。

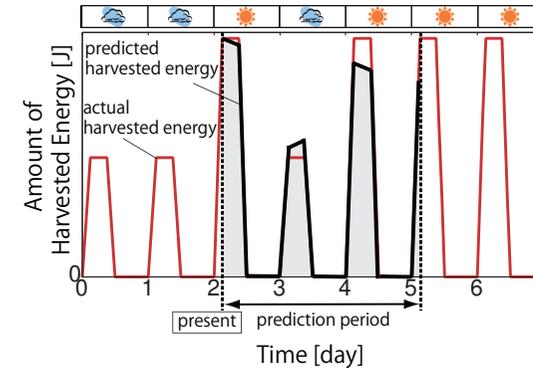


図 3 予測発電量
 Fig. 3 Predicted harvested energy.

3.2 発電量予測

本研究では、中継ノード選択に発電量予測を用いる。太陽光による発電量は日照量に比例する。日照量は日照時間、天候により決定されるため、天候予測を用いることで発電量の予測が可能である。前節で述べたように、本研究で想定する天候は晴天、曇天の 2 つのみであるため、予測の誤差を考慮して予測発電量は次のように表せる。

$$E_p[t+k] = P_h[k]E_s[t+k] + (1 - P_h[k])E_{\bar{s}}[t+k] \quad (2)$$

K を予測期間とすると、 $E_p[t+k]$ は t 回目のラウンドの時点の k ($k = 0, 1, \dots, K$) ラウンド未来の予測発電量であり、 $P_h[k]$ は k ラウンド後の天候の的中率、 $E_s[t+k]$ は実際の天候の場合の発電量、 $E_{\bar{s}}[t+k]$ は実際と異なる天候であった場合の発電量である。つまり、実際の天候が晴天の場合は、 $E_s[t+k]$ は晴天時の発電量、 $E_{\bar{s}}[t+k]$ は曇天時の発電量になる。 $P_h[k]$ は k ラウンド後の天候の的中率であるため、予測発電量 $E_p[t+k]$ は実際の天候の発電量と誤った天候の発電量を的中率で重み付けした期待値である。

天候の的中率 $P_h[k]$ は、予測期間の増加に伴って線形に低下するものとし、次式で表す。

$$P_h[k] = 1 - R_d \cdot k \quad (3)$$

R_d は 1 ラウンドあたりの的中率の低下率である。

図 3 に予測発電量の予測期間に対する変化の様子の例を示す。予測期間が増加するにつれて天候の的中率が低下するため、予測発電量は実際の発電量との差が大きくなる。

3.3 中継ノード選択手順

協力伝送では BS が各送信ノードに対して中継ノードを選択する．3.4 節の伝送可能条件 ($\Psi_{ii} \geq 1$) を満たす全ノードで以下の 1), 2), 3) を行う．本稿の中継ノード選択アルゴリズムは文献 [5] の手法に従う．文献 [5] では，電池残量の変動及びルーティング情報，ACK の受信エネルギーを含む消費エネルギーの期待値が考慮されていないが本稿では考慮する．

- 1) 送信ノード i についてその他のノード j との中継ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ (3.5 節) を算出し，次式のように中継ノード選択基準値が最も高いノードを送信ノード i の中継ノード r として選択．

$$r = \arg \max_j \{\Psi_{i,j}\} \quad (4)$$

ただし， $\Psi_{ii} \geq \Psi_{i,r}$ の場合は中継ノードを用いず，送信ノード i が単独で BS へデータ伝送を行う．

- 2) 中継ノードを用いる場合は，送信ノード i と選択された中継ノード r の電池残量を仮想的に更新し，中継ノードを用いない場合は，送信ノード i の電池残量のみを仮想的に更新する (3.6 節)．
- 3) ノード $i+1$ について 1), 2) を行い，以降伝送可能条件を満たす全ノードで繰り返す．

3.4 伝送可能条件

伝送開始時に以下の条件を満たすノード i のみ伝送を行う．

$$\Psi_{ii} = \frac{B_i[t]}{\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]} \geq 1 \quad (5)$$

$B_i[t]$ は送信ノード i の電池残量であり， $0 \leq B_i[t] \leq C_0$ (C_0 は電池容量) である．また， $\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]$ は送信ノード i が単独で BS へ伝送する場合の送信ノード i の消費エネルギーの期待値である．つまり，式 (1) は送信ノード i が単独で伝送を行う際における消費エネルギーの期待値以上の電池残量を持つ場合のみ伝送を開始することを示す．

$\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]$ は次式のようにデータの送信エネルギーの期待値とルーティング情報，ACK の受信エネルギーの和で表せる．

$$\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}] = \frac{\lambda_i L \cdot E_{TX}}{1 - P_{(i,BS)}} + (L_{RT} + \lambda_i L_{ACK}) E_{RX} \quad (6)$$

λ_i は送信ノード i が取得したデータの packets 数， L はデータのビット数， E_{TX} は 1 ビット当たりの送信エネルギーである．また， L_{RT} はルーティング情報のビット数， L_{ACK} は ACK のビット数であり， E_{RX} は 1 ビット当たりの受信エネルギーである．文献 [5] ではルーティ

ング情報と ACK の受信で消費するエネルギーは考えられていないが，本稿では考慮する．

3.5 中継ノード選択基準値

送信ノード i ，ノード j の電池残量と消費エネルギーの期待値の比が小さい方を中継ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ とし，次式で表す．

$$\Psi_{i,j} = \min\{\psi_i, \psi_j\} \quad (7)$$

$$\psi_i = \frac{B_i[t] + \sum_{k=0}^K E_p[t+k]}{\mathcal{E}_C[E_{c,i}]} \quad (8)$$

$$\psi_j = \frac{B_j[t] + \sum_{k=0}^K E_p[t+k]}{\mathcal{E}[E_{c,j}]} \quad (9)$$

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ は中継ノードを用いる場合の送信ノード i の消費エネルギーの期待値である．また， $B_j[t]$ ($0 \leq B_j[t] \leq C_0$) はノード j の電池残量， $\mathcal{E}[E_{c,j}]$ はノード j の消費エネルギーの期待値である．

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ は次式のようにデータの送信エネルギーの期待値とルーティング情報，ACK の受信エネルギーの和で表される．

$$\mathcal{E}_C[E_{c,i}] = \lambda_i \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + \lambda_i L_{ACK}) E_{RX} \quad (10)$$

α は次式で表される．

$$\alpha = 1 - P_{(i,BS)} P_{(i,j)} - P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) P_{(j,BS)} \quad (11)$$

$P_{(i,j)}$ は送信ノード i からノード j への伝送誤り率， $P_{(j,BS)}$ はノード j から BS への伝送誤り率である．

また， $\Psi_{i,j}$ の算出のためには，簡単化のため中継ノード自身が取得したデータは直接 BS へ送信され必ず伝送に成功すると仮定するとノード j の消費エネルギーの期待値は以下のように表せる．

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[E_{c,j}] &= \lambda_j L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + \lambda_j L_{ACK}) E_{RX} \\ &\quad + P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) \alpha^{-1} \lambda_i L \cdot E_{TX} \\ &\quad + (\alpha^{-1} \lambda_i L + \lambda_i L_{ACK}) \cdot E_{RX} \end{aligned} \quad (12)$$

λ_j はノード j が取得したデータの packets 数である．式 (12) の第 1 項はノード j 自身のデータの送信エネルギーであり，第 2 項はルーティング情報と自身のデータに対する ACK の受信エネルギーである．第 3 項は送信ノード i から受信したデータを中継して BS へ送る送信

エネルギーの期待値である．第 4 項は送信ノード i のデータの受信エネルギーと送信ノード i のデータに対する ACK の受信エネルギーである．

3.6 仮想電池残量の更新

仮想電池残量の更新は BS がルーティング情報をブロードキャストする前の中継ノード選択時に行う．各ノードは複数の送信ノードに対する中継ノードになりうる．選択基準の計算において送信ノード i と中継ノード r は電池残量を仮想的に更新する必要がある．各ノードの電池残量は送信ノード i のデータ伝送で消費するエネルギーの期待値を差し引くことで更新される．中継ノードを用いる場合，各ノードの電池残量は次式のように更新される．

$$B_i[t]^{(new)} = B_i[t]^{(old)} - \left\{ \alpha^{-1} \lambda_i L \cdot E_{TX} + \lambda_i L_{ACK} \cdot E_{RX} \right\} \quad (13)$$

$$B_r[t]^{(new)} = B_r[t]^{(old)} - \left\{ (1 - P_{(i,r)}) P_{(i,BS)} \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} + (\alpha^{-1} \lambda_i L + \lambda_i L_{ACK}) \cdot E_{RX} \right\} \quad (14)$$

中継ノードを用いない場合，送信ノード i の電池残量の更新は次式で表される．

$$B_i[t]^{(new)} = B_i[t]^{(old)} - \left\{ \frac{\lambda_i L \cdot E_{TX}}{1 - P_{(i,BS)}} + \lambda_i L_{ACK} \cdot E_{RX} \right\} \quad (15)$$

4. 数 値 例

提案した発電量予測を利用した中継ノード選択手法の平均パケット伝送率に対する効果を計算機シミュレーションによって評価する．本稿では，再送回数に関わらず最終的に BS に誤り無く伝送されたパケットを伝送成功パケットと定義する．ノードが観測することで生じる各ラウンドあたりの全生成パケット数に対する伝送成功パケット数の比をパケット伝送率とする．シミュレーションに用いる共通のパラメータを表 1 に示す．

データ採取・伝送のラウンド T に対し，データの送受信，及びデータ伝送失敗時の再送の間隔は非常に小さいと想定する．シミュレーション上では，データの送受信，及びデータ伝送失敗時の再送にかかる時間は十分に小さく無視できる (0 秒) とする．ノードがデータの送受信で消費するエネルギーは Crossbow 社のセンサノード MICAz の値であり，アンテナから放射されるエネルギーは送信エネルギー E_{TX} の $1/205.7$ である [8]．電池容量を伝送が必ず成功するとした場合にノードが 2 日間稼働可能なエネルギーとする ($C_0 = 2\Delta$)．ここで， Δ を伝送が必ず成功するとした場合にノードが 1 日稼働可能なエネルギーとし，1 日あたりのデータの送信エネルギー，ルーティング情報，ACK の受信エネルギーの和として次

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameters.

BS の電波到達範囲	40m
1 ビット当たりの送信エネルギー E_{TX}	$0.60\mu\text{J}$
1 ビット当たりの受信エネルギー E_{RX}	$0.67\mu\text{J}$
データ，ルーティング情報のパケット長 L, L_{RT}	100bit
ACK のパケット長 L_{ACK}	56bit
データのバケット数 λ_i, λ_j	1
データの採取・伝送間隔 (ラウンド) T	1 時間
変調方式	BPSK
通信路	AWGN
伝播損失	3 乗則
許容する誤り率 P_a	0.1

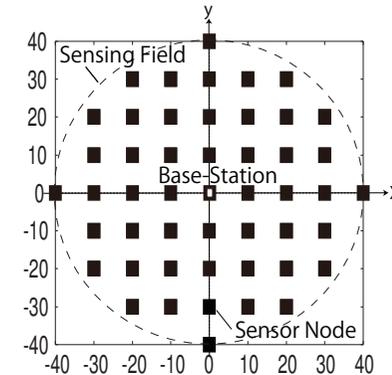


図 4 ノード配置
Fig. 4 Node allocation.

式で表される．

$$\Delta = 24(\lambda_i L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + \lambda_i L_{ACK}) E_{RX}) \quad (16)$$

このとき，従来の発電量予測を用いない協力伝送の場合に常に少なくとも 85% の平均パケット伝送率を達成するエネルギーを日中の 1 時間あたりの平均発電量とする ($E_{ave} = 0.114\Delta$)．ノード配置は図 4 のように均等配置とし，配置間隔を 10m，ノード数を 48 個とする．本システムでは，BS の電波到達範囲を観測領域としており，BS は全ノードへ誤り無く信号を送送できる．また，ノードの通信可能な領域は平均誤り率にのみ依存し，どのノードにもデータは届き得る．そのため，中継ノードの選択の計算では，送信ノード以外の全てのノードが

中継ノード候補になる。しかし、送信ノードからBSよりも遠方にあるノードを中継ノードにした場合、中継ノードが誤り無く送信ノードのデータを受信する確率は、BSが送信ノードのデータを受信する確率よりも低くなり、データの中継が必要なくなる確率が高くなる。観測開始時の全ノードの電池残量を0[J]とし、電池残量は次のように更新されるとする。

$$\begin{cases} B_i[t] = 0 & (t = 1) \\ B_i[t] = B_i[t-1] - E_{c,i}[t-1] + E_{h,i}[t] & (t \geq 2) \end{cases} \quad (17)$$

$B_i[t]$ はノード i の t ラウンドのデータ伝送開始時の電池残量、 $B_i[t-1]$ は $t-1$ ラウンドのデータ伝送開始時の電池残量、 $E_{c,i}[t-1]$ は $t-1$ ラウンドのデータ伝送で消費したエネルギーである。 $E_{h,i}[t]$ は $t-1$ ラウンドのデータ伝送サイクル終了時から t ラウンドのデータ伝送開始時まで取得したエネルギーである。また、天候変化はマルコフ過程に従い、同じ天候が連続する確率は0.7とする。

4.1 発電量予測を利用した中継ノード選択手法の平均パケット伝送率への影響評価

図5に発電量予測を利用する場合と利用しない場合の協力伝送の観測時間に対する平均パケット伝送率の変化の様子を示す。的中率は1日あたり10%低下 ($R_d = 0.1/24$) とし、予測期間は3日間 ($T = 3 \cdot 24$) とする。図5では観測開始から50日間の平均パケット伝送率を示しているが、平均パケット伝送率は昼夜の取得エネルギーの変動に伴って1日毎に変動している。そのため、図5で平均パケット伝送率は帯状に見えている。また、平均パケット伝送率の変動は一定時間後に一定の変動に収束している。これは、電池残量の初期値(0[J])の影響が時間経過とともに無くなるためである。なお、観測開始時の全ノードの電池残量を0[J]としているため、観測開始時の平均パケット伝送率は伝送方法に関わらず0[%]だが、図5では70[%]以上の範囲のみを示している。図5より、予測発電量を中継ノード選択に利用が平均パケット伝送率の最小値の向上に有効であることがわかる。

図5の変動が一定に収束してからの2日間の平均パケット伝送率の変動の様子を拡大して図6に示す。いずれの場合でも発電量の大きい日中に平均パケット伝送率の最大値を示し、最小値は前日の日没から期間が長く、発電量が小さい明け方に示すことがわかる。提案手法を用いた場合、発電量予測を用いない場合に比べて平均パケット伝送率が最大値をとる期間がわずかに短くなっているが、平均パケット伝送率の最小値を約4%向上できている。これは、発電量の予測によって事前に対応することで曇天が連続することによる取得エネルギーの低下の影響を軽減できたためだと考えられる。

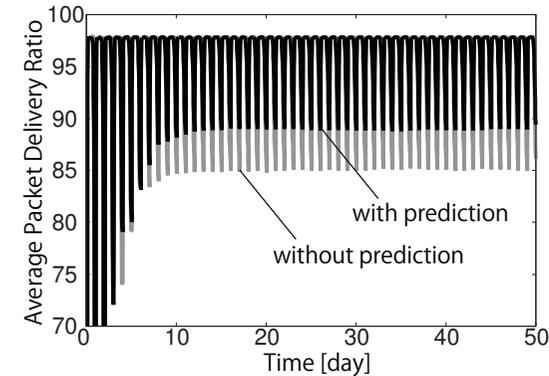


図5 発電量予測導入の効果
 Fig. 5 Effect of prediction of harvested energy.

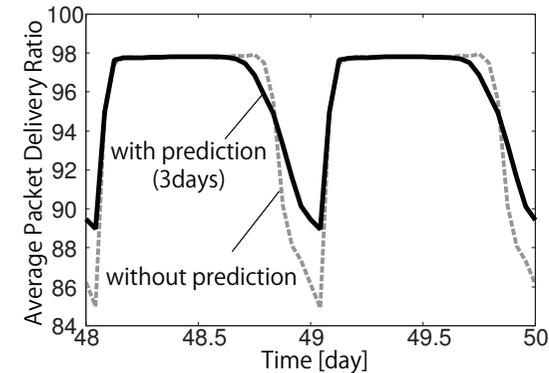


図6 2日間のパケット伝送率の変化
 Fig. 6 Variations of the average packet delivery ratio in a 2-day time frame.

4.2 予測期間の影響評価

図7に発電量予測を利用した協力伝送の予測期間に対する平均パケット伝送率の最小値の変化を示す。ただし、この最小値はそれぞれの予測期間で観測開始から50日目の最小の平均パケット伝送率であり、昼夜の平均パケット伝送率の変化の幅が一定値に収束した後の値である。これより、予測期間を延長した場合、予測期間が3日間までは最小平均パケット伝送率は向上するが、それ以上に延長しても発電量予測の効果は変わらないことがわかる。

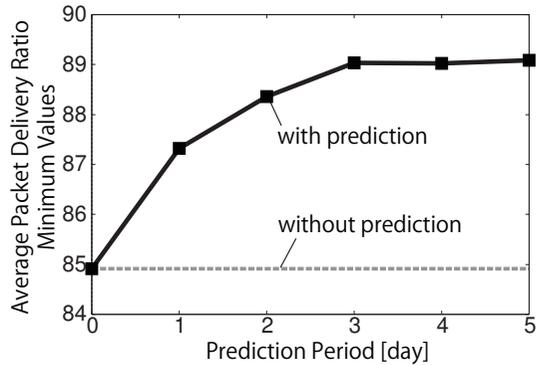


図7 予測期間に対する最小平均パケット伝送率の変化

Fig. 7 Variation of the minimum average packet delivery ratio depending on the prediction period.

提案手法では、予測発電量の積分値が中継ノードの選択に用いられる。予測発電量は実際の発電量の期待値であるため、予測期間が長くなると予測発電量の積分値が実際の発電量の積分値に近づき、予測発電量に天候による差が出にくくなる。このため、予測期間の延長の効果が無くなったのだと考えられる。

4.3 異なる天候変化環境での特性評価

本稿では、天候変化はマルコフ過程に従う。これまでマルコフ過程における同じ天候が連続する確率は0.7としてきた。本節では、この同じ天候が連続する確率を変えた場合の評価を行う。図8に同じ天候が連続する確率に対する平均パケット伝送率の最小値の変化の様子を示す。ただし、同じ天候が連続する確率が0.5の場合は、ランダムに天候が変化する場合と同義である。図8では、発電量予測の利用の有無に関わらず、同じ天候が連続する確率が増加するほど、平均パケット伝送率の最小値が低下している。これは、曇天が連続しやすくなることで、電池切れが起こりやすくなり平均パケット伝送率が低下したのだと考えられる。このとき、曇天と同様に晴天も連続しやすくなるが、電池には容量以上には充電できないため、曇天が連続する影響が大きくなる。また図8より、いずれの天候環境でも発電量予測を利用した場合に平均パケット伝送率の最小値が向上していることがわかる。同じ天候が連続する確率が低い場合は、発電量予測を導入する以前に高い平均パケット伝送率を達成しているため、発電量予測による効果は小さい。しかし、同じ天候が連続する確率が高い場合は、発電量予測の導入によって一定の最小平均パケット伝送率の向上が成されている。

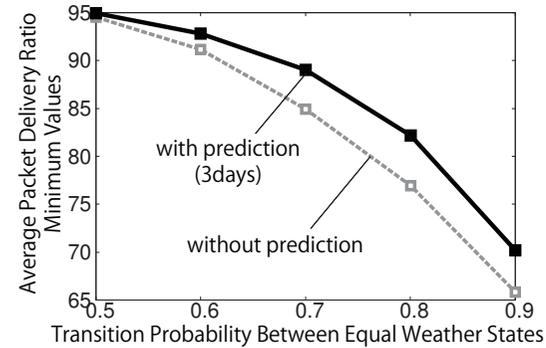


図8 同じ天候が連続する確率に対する最小平均パケット伝送率の変化

Fig. 8 Variation of the minimum average packet delivery ratio depending on the transition probability between equal weather states.

5. まとめ

本稿では、天候変化による平均パケット伝送率の低下を改善するために、発電量予測を利用した中継ノード選択手法を提案した。提案手法により、平均パケット伝送率の最小値を向上できることを示した。また、発電量の予測期間の提案手法の効果に対する影響を明らかにした。異なる天候変化環境で評価を行い、提案手法は天候によらず常に高い平均パケット伝送率を達成できることを示した。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)の助成をうけて行われたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Paradiso, J.A. and Starner, T.: Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.4, No.1, pp.18–27 (2005).
- 2) Roudy, S., Steingart, D., Frechette, L., Wright, P. and Rabaey, J.: Power sources for wireless sensor networks, *1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, Vol.2920, pp.1–17 (2004).
- 3) Sazonov, E., Li, H., Curry, D. and Pillay, P.: Self-Powered Sensor Monitoring of Highway Bridges, *IEEE Sensors Journal*, Vol.9, No.11, pp.1422–1429 (2009).
- 4) Cerutti, I., Fumagalli, A. and Gupta, P.: Delay Models of Single-Source Single-Relay Co-

- operative ARQ Protocols in Slotted Radio Networks With Poisson Frame Arrivals, *IEEE Trans. Networking*, Vol.16, No.2, pp.371–382 (2008).
- 5) Tacca, M., Monti, P. and Fumagalli, A.: Cooperative and Reliable ARQ Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.6, No.7, pp.2519–2529 (2007).
- 6) Medepally, B. and Mehta, N.B.: Voluntary Energy Harvesting Relays and Selection in Cooperative Wireless Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.9, No.11, pp.3543–3553 (2010).
- 7) 太田健太郎, 小林健太郎, 山里敬也, 片山正昭: 太陽エネルギーを利用した無線センサネットワークのための停止ノード再稼働条件を導入した協力伝送手法, 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J95-B, No.2, pp.246–256 (2012).
- 8) de Meulenaer, Gosset, F., Standaert, F.X. and Pereira, O.: On the Energy Cost of Communication and Cryptography in Wireless Sensor Networks, *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing (WIMOB'08)*, pp.580–585 (2008).