マルチキャスト通信におけるL_1ノルム最小化による パケット損失率推定法とパスの選択法

長岡技術科学大学　大学院工学研究科

吉川泰司
中川健治
渡部康平

研究背景

通信事業において，ネットワーク内部状態の把握は重要

内部状態には**パケット損失率**，遅延などがある

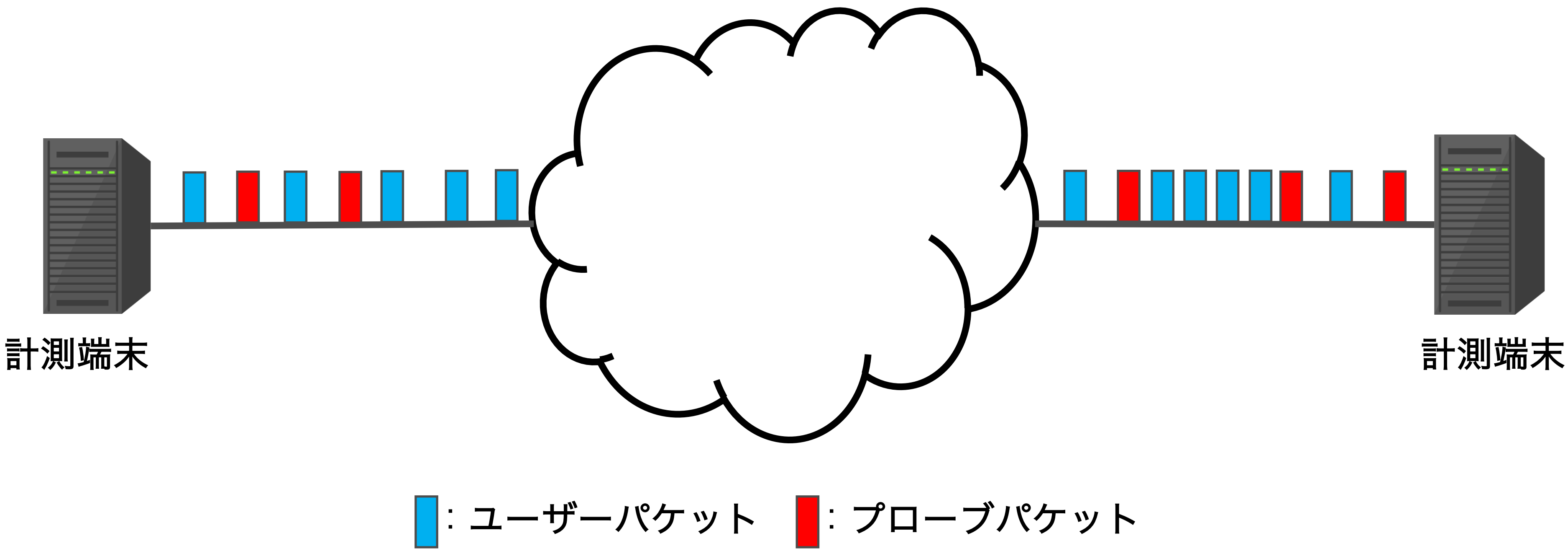
本研究では**ネットワークの輻輳の最も直接的な指標であるパケット損失率**に注目

内部状態を把握する手法は複数存在するが，いずれも**計測精度とネットワークの負荷にトレードオフ**の関係がある

計測手法

アクティブ計測

- 計測用のプローブパケットを用いる手法
- プローブパケットを送出し，ネットワーク特性を計測
- 計測精度とネットワーク負荷にトレードオフの関係

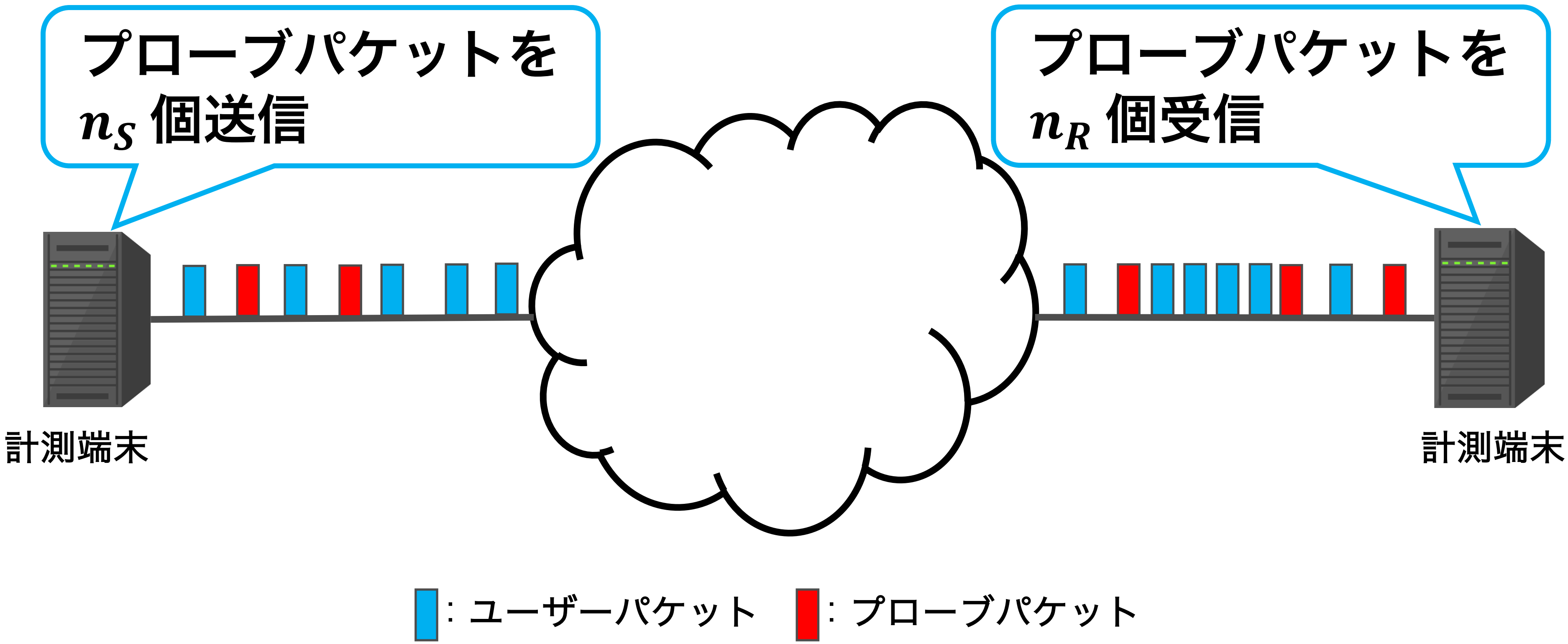


計測手法

アクティブ計測

パケット損失率

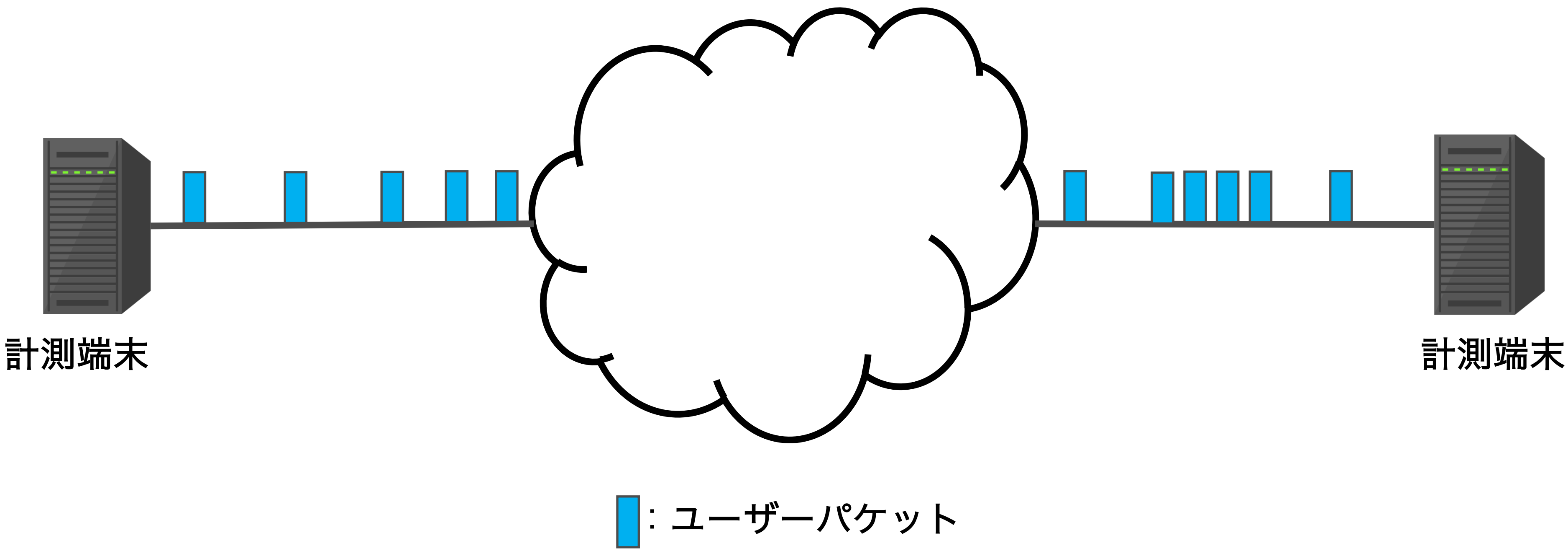
$$l = 1 - \frac{n_R}{n_S}$$



計測手法

パッシブ計測

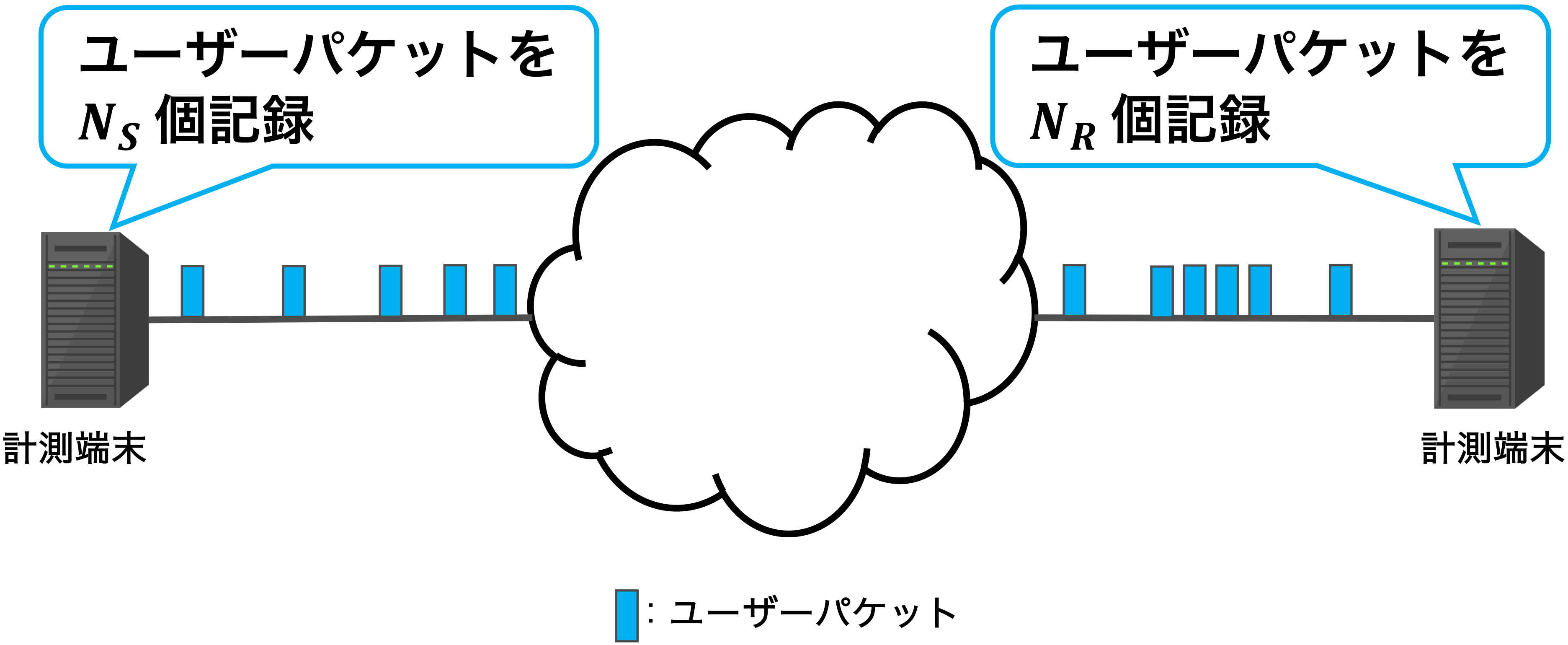
- プローブパケットを使用せず，端末間で計測する手法
- ユーザーパケットを記録して計測
- 計測精度と計測装置の負荷にトレードオフの関係



計測手法

パッシブ計測

パケット損失率　　$\alpha = 1 - \frac{N_R}{N_S}$



パケット損失率推定におけるネットワークトモグラフィ

アクティブ計測はネットワークに本来必要のないパケットを送信し，パケット損失率推定では輻輳しているリンクに送信されることでユーザトラフィックに影響を与える

従来のマルチキャストの推定法ではアクティブ計測のみの推定法が多い

アクティブ計測とパッシブ計測との併用した手法はユニキャストになっている

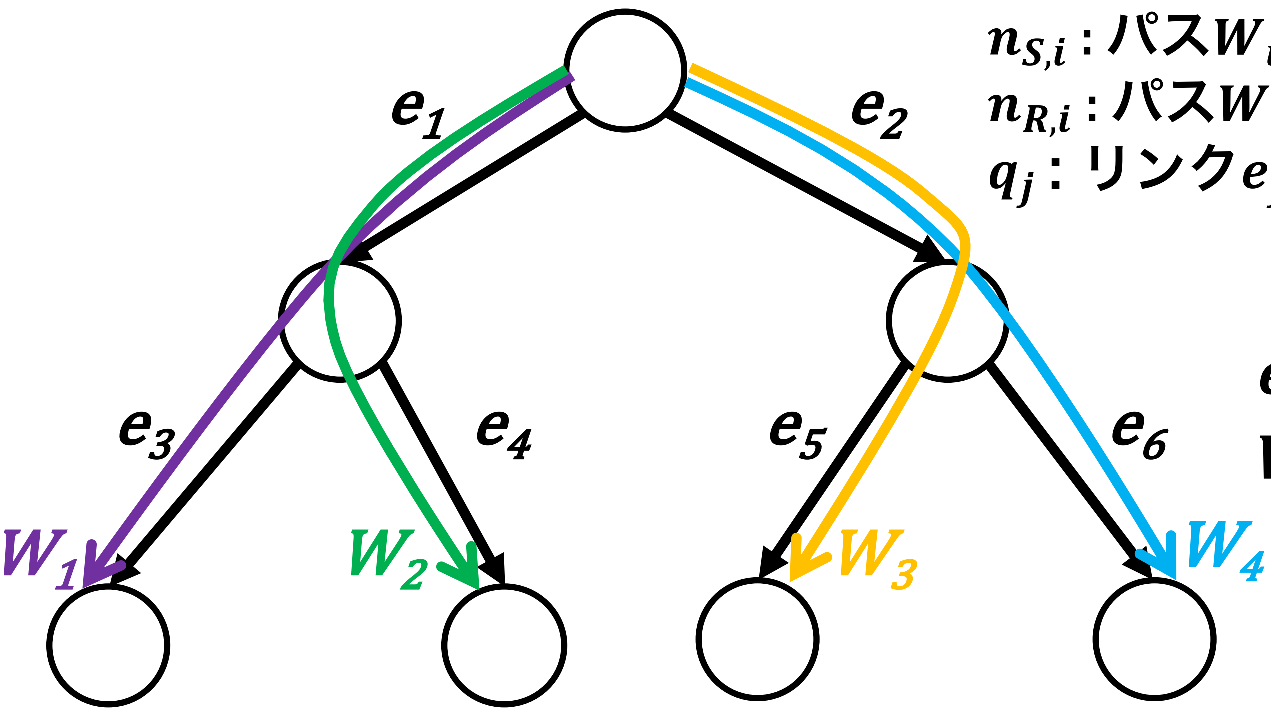
マルチキャストにおいてアクティブ計測を削減することを考える

マルチキャストのパケット損失率推定 従来法[1]

アクティブ計測のみ用いる

パケット損失率 $l_i = 1 - \frac{n_{R,i}}{n_{S,i}}$

パケット到達率 $1 - l_i = \prod_{e_j \in W_i}(1 - q_j)$



$n_{S,i}$: パスW_iに送信したパケット数

$n_{R,i}$: パスW_iで受信したパケット数

q_j : リンクe_jのパケット損失率

$e_j(j = 1, 2, \ldots 6)$

$W_i(i = 1, 2, 3, 4)$

[1] M.H. Firooz and S. Roy, “Network tomography via compressed sensing,” Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)IEEE, pp.1–5 2010.

マルチキャストのパケット損失率推定 従来法[1]

パケットの到達率を対数変換する

$$\mathbf{1} - \boldsymbol{l_i} = \prod_{e_j \in W_i} (\mathbf{1} - \boldsymbol{q_j})$$

対数

$$\vec{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{A}\vec{\boldsymbol{x}}$$

$\boldsymbol{A}$: ルーティング行列

$$\boldsymbol{y_i} = -\log(\mathbf{1} - \boldsymbol{l_i}), \boldsymbol{x_j} = -\log(\mathbf{1} - \boldsymbol{q_j})$$

対数変換したことにより**線形方程式が得られる**

マルチキャストのパケット損失率推定 従来法[1]

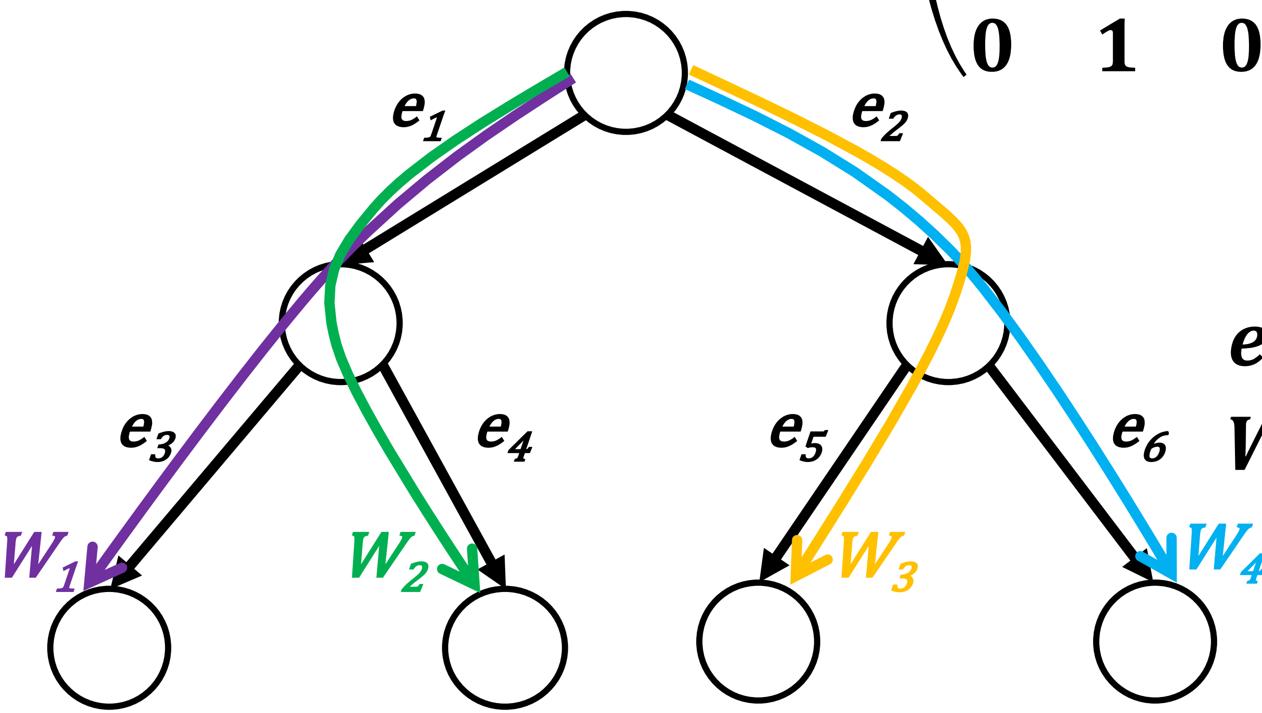
ルーティング行列A

ネットワークの構造を示す

行　パスW_i

列　リンクe_j

$$A = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}\begin{array}{cc} \begin{array}{cccccc} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 \end{array} & \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{array}{c} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \end{array} \end{array}$$



$e_j(j = 1, 2, \dots 6)$

$W_i(i = 1, 2, 3, 4)$

マルチキャストのパケット損失率推定 従来法[1]

ネットワーク内でパケット損失が起こるリンクは少なく，大部分が0(スパース)である

スパース性を持つと仮定する

得られた線形方程式

$$\vec{y} = A\vec{x}$$

を制約条件とするL_1ノルム最小化問題として定式化

L_1ノルム最小化問題

$$\hat{\vec{x}} = \underset{\vec{x}}{\operatorname{argmin}} \|\vec{x}\|_1 \ \ \mathrm{s.t.}\ \vec{y} = A\vec{x}$$

ユニキャストのパケット損失率推定 従来法[2]

アクティブ計測とパッシブ計測を併用する

アクティブ計測パスを減らすことができる

アクティブ計測 $\vec{y} = A\vec{x}$

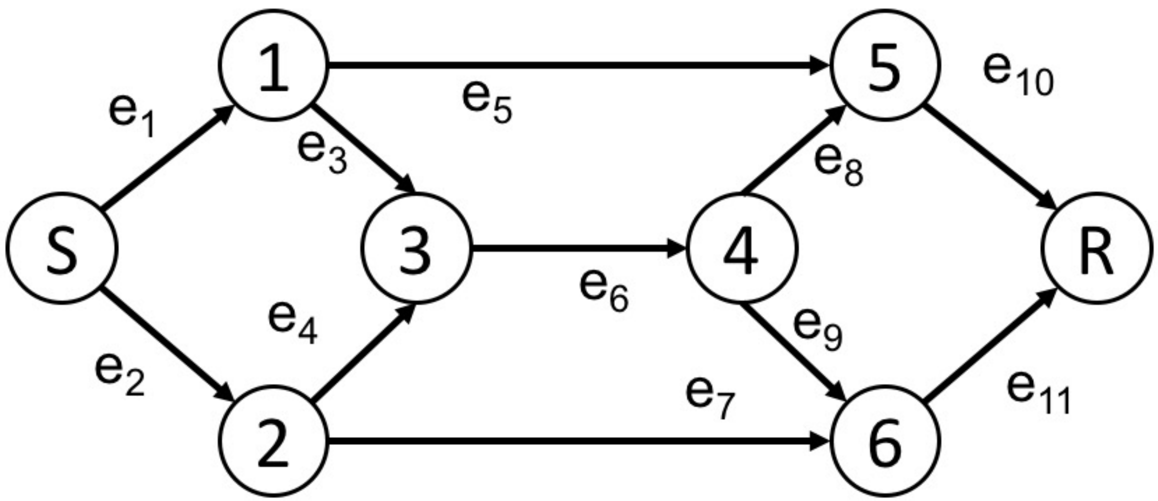
パッシブ計測 $\alpha = \vec{\beta}^T \vec{l}$

α ：ネットワークのパケット損失率

$\vec{\beta}$：パスW_iの利用率 $\vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_i)$

l_i ：パスW_iのパケット損失率

$\vec{l} = (l_1, \dots, l_i)^T$



[2]手崎達也，渡部康平，中川健治，“L1 ノルム最小化によるパケット損失率推定の高速化”，電子情報通信学会 総合大会，2018

ユニキャストのパケット損失率推定 従来法[2]

アクティブ計測を全てのパスで行うとプローブパケットが多くなりネットワークに負荷がかかる

アクティブ計測のパスを減らす

アクティブ計測を行うパスと行わないパスに分割

$$A^T = \left(A_o^T, A_m^T\right), \vec{\beta}^T = \left(\vec{\beta}_o, \vec{\beta}_m\right),$$

$$\vec{l}^T = \left(\vec{l}_o, \vec{l}_m\right), \vec{y}^T = \left(\vec{y}_o, \vec{y}_m\right)$$

o: observed
m: missing

アクティブ計測 $\vec{y}_o = A_o\vec{x}$

パッシブ計測 $\alpha = \vec{\beta}_o^T\vec{l}_o + \vec{\beta}_m^T\vec{l}_m$

テイラー近似

$$\alpha - \vec{\beta}_o^T\vec{l}_o = \vec{\beta}_m^T A_m\vec{x}$$

ユニキャストのパケット損失率推定 従来法[2]

アクティブ計測　$\vec{y}_o = A_o\vec{x}$

パッシブ計測　$\alpha - \vec{\beta}_o^T\vec{l}_o = \vec{\beta}_m^T A_m\vec{x}$

損失率の高いリンクは少なく，スパース性持つと仮定でき，L_1ノルム最小化問題として推定できる

L_1ノルム最小化問題

$$\hat{\vec{x}} = \underset{\vec{x}}{\operatorname{argmin}} \|\vec{x}\|_1$$

$$\text{s.t. } \vec{y}_o = A_o\vec{x},\ \alpha - \vec{\beta}_o^T\vec{l}_o = \vec{\beta}_m^T A_m\vec{x}$$

従来法の問題

アクティブ計測のみのマルチキャストの従来法はプローブパケットを流すためユーザトラフィックに影響を与える

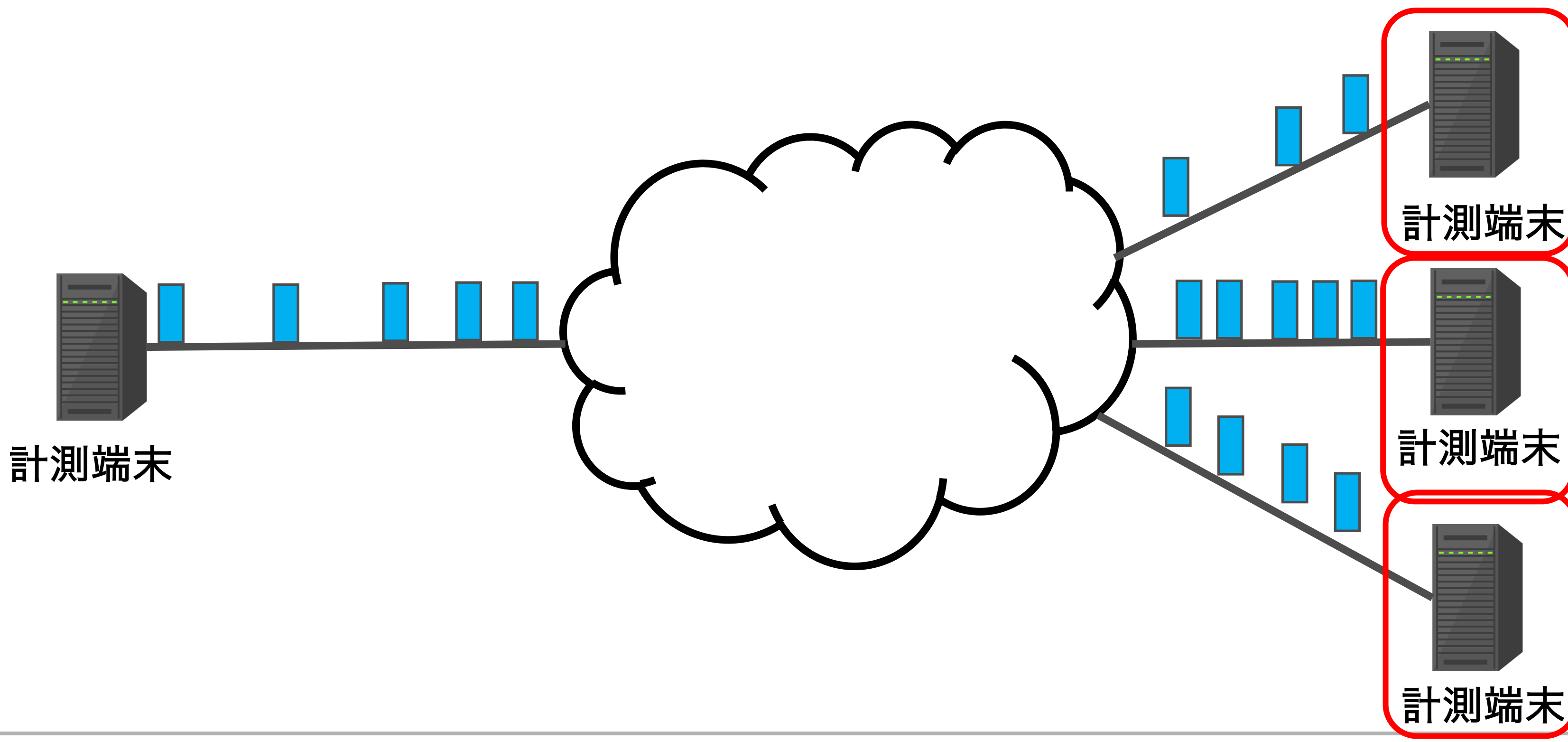
目的１
従来のユニキャストの推定法を拡張し，マルチキャストにおいて，アクティブ計測を少なくリンクのパケット損失率を推定する手法

目的２
アクティブ計測を行うパスの選択

従来手法の改良

従来法ではユニキャストのみでしか使えないため,
これを**マルチキャストで使えるように拡張**する

受信機が複数になることによりパッシブ計測から
得られる情報が増え，プローブによる負荷を軽減



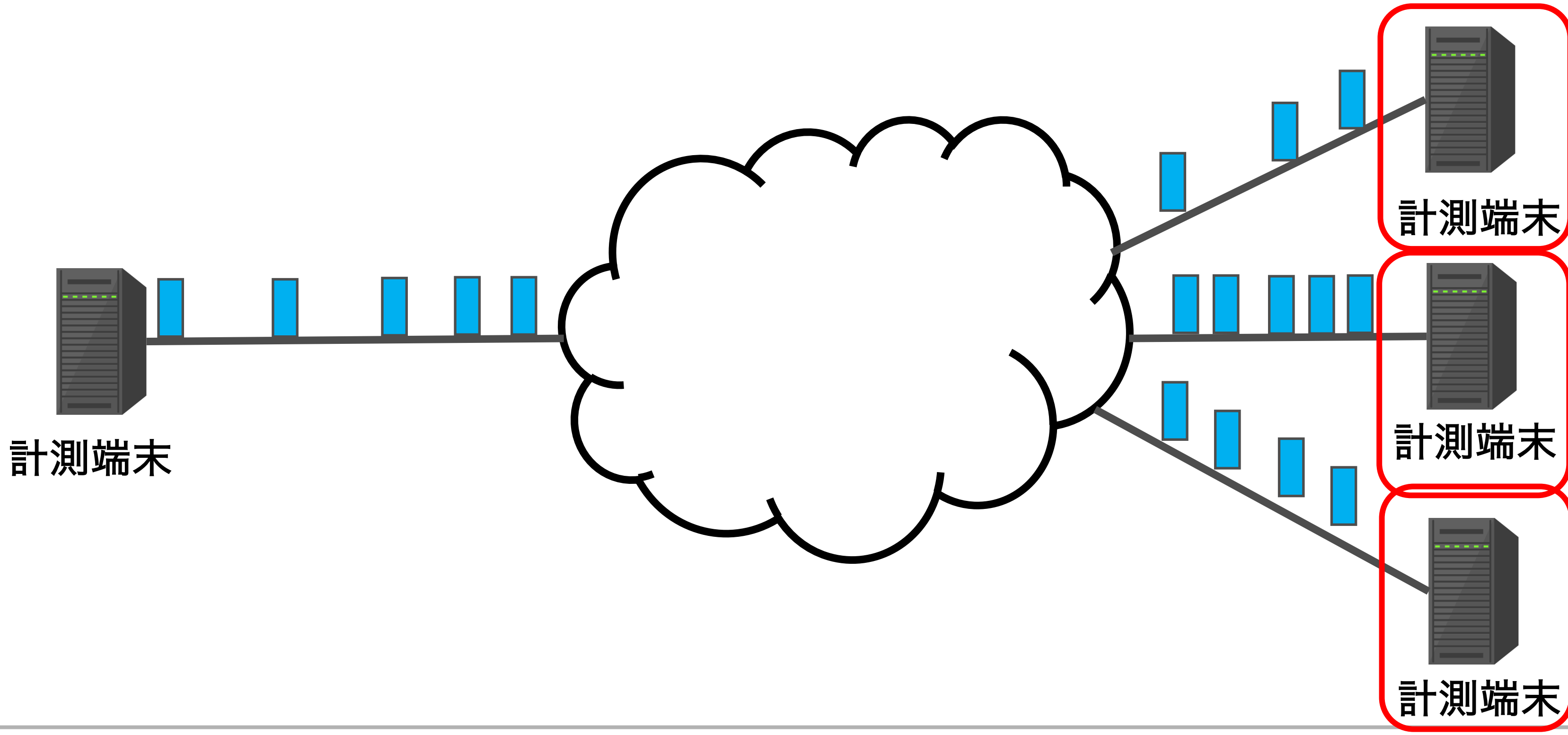
提案法

パッシブ計測で観測されるパケット損失率

受信機が複数になったことにより,

スカラー α → ベクトル $\vec{\alpha}$

受信機数分の列ベクトル



提案法

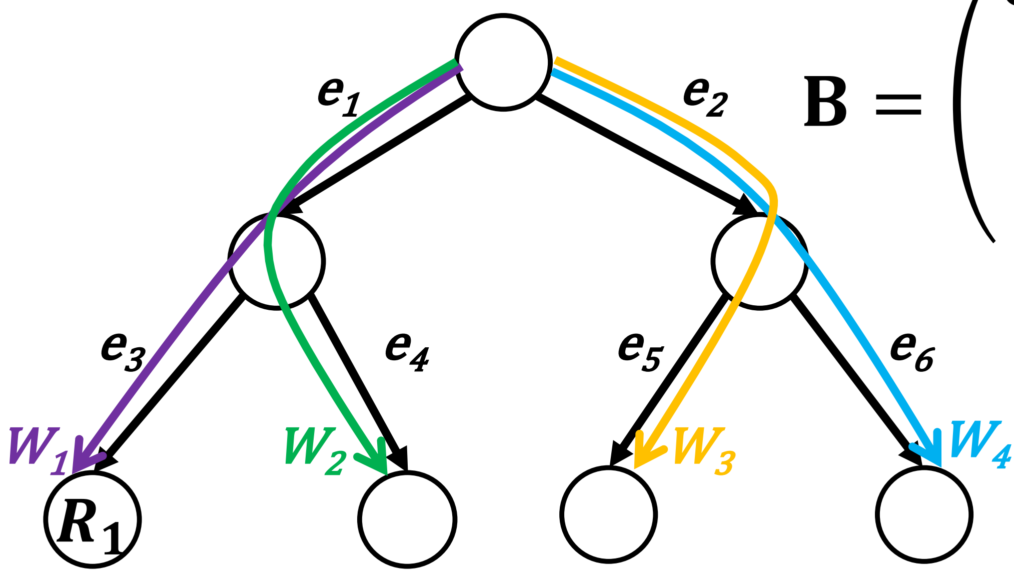
パスの利用率

$\vec{\alpha}$になったことにより,

ベクトル $\vec{\beta}$ → 行列 B

行：パス　　列：受信機

例)



$$\mathrm{B} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \end{array}$$

提案法

受信機が複数になったことにより,

スカラー α → ベクトル $\vec{\alpha}$

ベクトル $\vec{\beta}$ → 行列 B

$\vec{\alpha}$ 受信機数のパケット損失率の列ベクトル

B パスの利用率の行列

パッシブ計測の式は

$$\vec{\alpha} - \mathbf{B}_o^T \vec{l}_o = \mathbf{B}_m^T A_m \vec{x}$$

となり

$$\hat{\vec{x}} = \underset{\vec{x}}{\operatorname{argmin}} \|\vec{x}\|_1$$

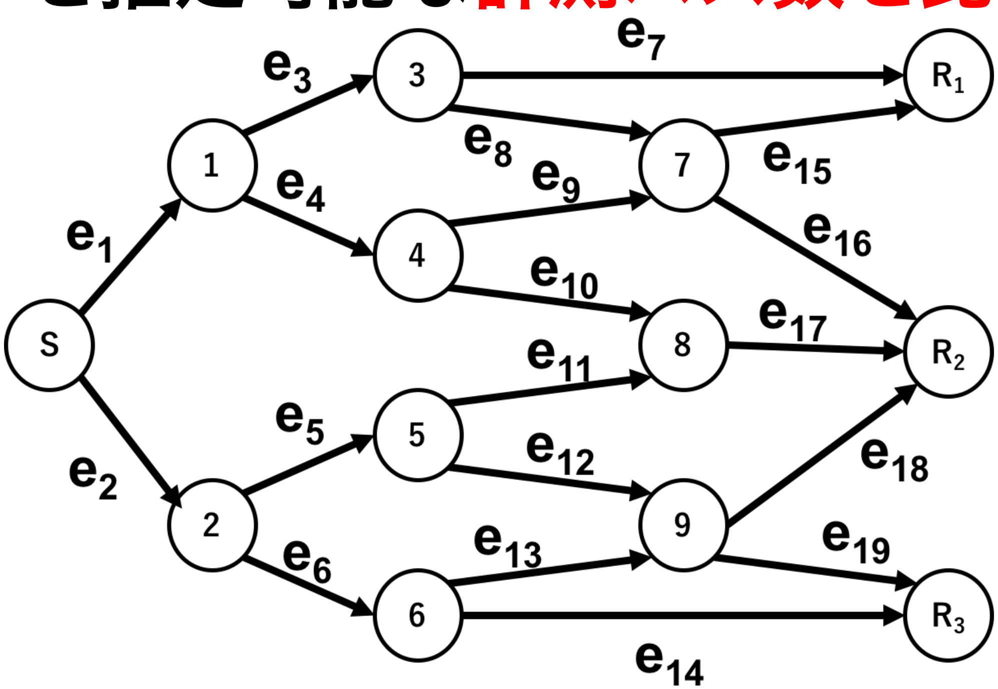
$$\text{s.t. } \vec{y}_o = A_o \vec{x},\ \vec{\alpha} - \mathbf{B}_o^T \vec{l}_o = \mathbf{B}_m^T A_m \vec{x}$$

シミュレーション条件

以下のトポロジーでパケット損失リンクは1つとする

損失発生リンクのパケット損失率のみ0より大きい推定値が得られた場合に推定可能とする

アクティブ計測のみの場合と提案法で全てのリンクを推定可能な計測パス数を比較する



パス数　：12

$W_i \ (i = 1, 2, \ldots, 12)$

リンク数：19

$e_j \ \ (j = 1, 2, \ldots, 19)$

損失率：0.05

パスの利用率$\beta_i = 1/12$

結果

全てのリンクを推定可能な計測パス数の比較

計測パス数	12	11	10	9	8	7	…
アクティブ計測のみ	○	○	○	×	×	×	…
提案法	○	○	○	○	○	×	…

○：推定可能　×：推定不可

最小の計測パス数
- アクティブ計測のみ　10本
- 提案法　8本

パッシブ計測から得られる情報が増えたため
- 提案法の方が計測パス数が少なく推定可能

計測パスの選択

計測パスをいくつ削減できるのかは推定を行わないとわからない

計測を実際に行なって確かめるのはネットワークに負荷をかけてしまう

計測せずに推定可能か評価する方法が必要になる

全てのリンクを推定可能な計測パスの選択方法

L_1ノルム最小化問題の完全再現十分条件

完全再現：正しい解が再構成されること

非零成分の個数が高々K個の場合，完全再現十分条件は

$$\mathbf{spark}(A_o) > 2K$$

$\mathbf{spark}(A_o)$：行列A_oの一次従属な列ベクトル数の最小値

となる[3]

sparkの計算量は$O(2^L)$であり，現実的ではない

L :ネットワークのリンク数

インコヒーレンスによって計算量を抑える方法が提案されている[4],[5]

[3] D. L. Donoho, “Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via l^1 minimization,” Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 100, no. 5, 2197 (2003).
[4] S. Gleichman and Y. C. Eldar, “Blind Compressed Sensing,” IEEE Trans. Info. Theory, vol. 57, no. 10, 6958 (2011).
[5] 三村 和史. ”圧縮センシング -疎情報の再構成とそのアルゴリズム-”. 数理解析研究所講究録. 第1803巻. 2012年

L_1ノルム最小化問題の完全再現十分条件

インコヒーレンス

A_oの異なる2つの列ベクトル$\overrightarrow{\alpha_i}, \overrightarrow{\alpha_j}$の方向余弦の絶対値の最大値

$$\mu(A_o) := \max_{1 \le i \le j \le L} \frac{\left|\left\langle \overrightarrow{\alpha_i}, \overrightarrow{\alpha_j} \right\rangle\right|}{\left\|\overrightarrow{\alpha_i}\right\|_2 \left\|\overrightarrow{\alpha_j}\right\|_2}$$

行列A_oの一次従属な列ベクトル数の最小値[2]

$\mu(A_o)$の**計算量は$O(L^2)$**

インコヒーレンスを用いることで

$$\mathrm{spark}(A_o) \ge \left(1 + \frac{1}{\mu(A_o)}\right)$$

完全再現十分条件は$\mathrm{spark}(A_o) > 2K$より,

$$K < \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\mu(A_o)}\right)$$

L_1ノルム最小化問題の完全再現十分条件

完全再現十分条件

$$K < \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\mu(A_o)}\right) := \tau(A_o)$$

$\tau(A_o)$を求めることで評価できる

パケット損失率推定におけるKは損失の発生するリンク数であり，損失リンク数が

1個の場合　$1 \leq \tau(A_o)$
2個の場合　$2 \leq \tau(A_o)$　…

を満たすA_oを選択する

提案法の計測パスの選択法

完全再現十分条件

$$K < \tau(A_o)$$

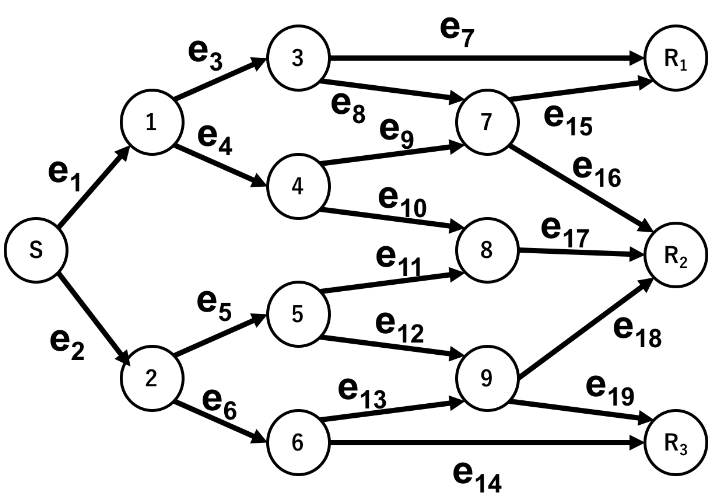
マルチキャストの従来法に適用するためには
- 完全再現十分条件が真であること
- A_oに全てのリンクを含むこと

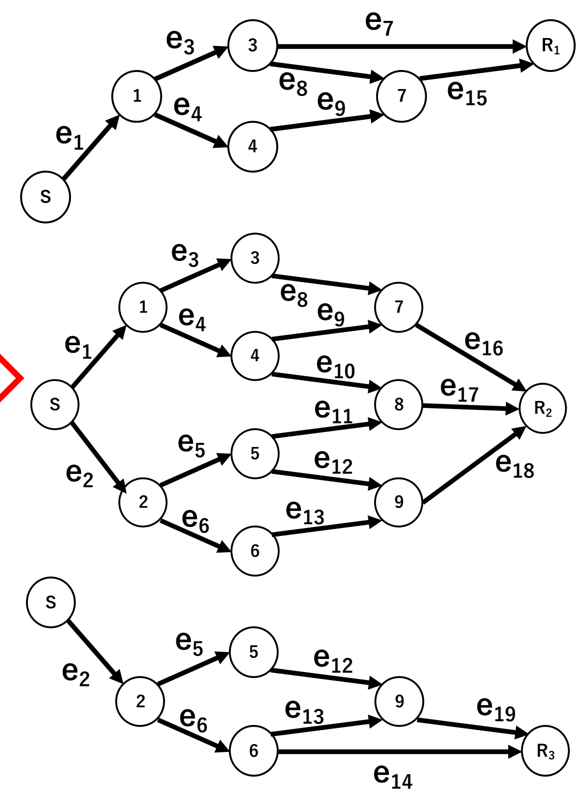
提案法ではパッシブ計測も用いているためA_oに全てのリンクを含む必要はない

提案法の計測パスの選択法

パッシブ計測は端末間のパケット損失率が得られる

トポロジーを1対1に分割した場合に，分割したトポロジー毎に1つのパッシブ計測の式が得られる





提案法の計測パスの選択法

分割したトポロジー内に,
A_oに含まれない未計測のリンクが1個以下であれば
パッシブ計測で推定可能となる

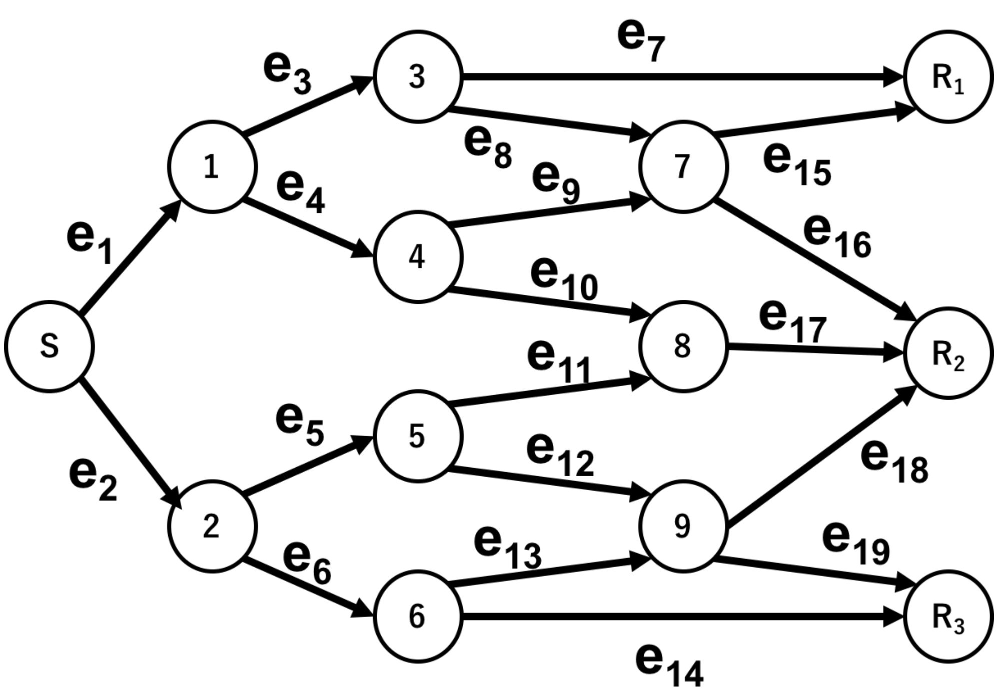
提案法の計測パスの選択法

・$K < \tau(A_o)$が真である
・分割したトポロジー内でA_oに含まれない未計測のリンクが1個以下

シミュレーション条件

以下のトポロジーでパケット損失リンクは1つとする

計測パスを減らしていき，全ての組合せを全探索で，提案法の計測パスの選択法を満たしたものが推定可能であることを示す



パス数　：12

$W_i \ (i = 1, 2, \ldots, 12)$

リンク数：19

$e_j \ \ (j = 1, 2, \ldots, 19)$

結果

計測パス数に対する条件を満たす組合せ数

計測パス数	12	11	10	9	8	7	…
完全再現十分条件	1	8	20	16	4	0	…
提案法のパス選択法	1	8	16	16	3	0	…

上表のうち全てのリンクを推定可能な組合せの割合

計測パス数	12	11	10	9	8	7	…
完全再現十分条件[%]	100	80	100	100	75	0	…
提案法のパス選択法[%]	100	100	100	100	100	0	…

表から完全再現十分条件だけでは推定可能な組合せのみを選択できていないが，提案法のパス選択法では選択できている

まとめ

結論

・従来法を拡張し，マルチキャスト通信におけるパケット損失率推定法を提案し，アクティブ計測のみの結果と比べ，**計測パスを削減することができた**

・パスの選択法提案し，**アクティブ計測のパスを削減するA_oを選択できる**ことを示した

今後の展望

・パケット損失発生するリンクが複数の場合
・計測パスを削減したA_oを探索するアルゴリズム
・パケットを流したシミュレーション