

伝送線による共振器ネットワークの熱雑音と PT 対称性

兵庫県立大学 大学院 理学研究科, Amazon.com, Inc.^A

石川 潔, B. Patton^A

Thermal noise and PT symmetry in resonator networks of transmission lines

University of Hyogo, Amazon.com, Inc.^A

Kiyoshi Ishikawa, Brian Patton^A

同軸ケーブルなどの伝送線は実験必需品である。高周波信号を分岐させるのに「T アダプタを使わない! インピーダンス整合を忘れるな」と、実験を始めたばかりの頃、先輩に教えてもらった。50 Ω で整合した伝送線を増幅器につなぐと、50 Ω 相当のジョンソン・ナイキスト熱雑音が信号に重畳する。古典信号を扱う際は初段が重要であり、熱雑音だから、50 Ω の信号源と初段増幅器を冷却すれば雑音は低減する。一方、室温のまま熱雑音を低減させる方法も NMR 計測などで試され、その回路は、むしろインピーダンスが整合していない。我々は、両端を接地した伝送線をラジオ波周波数の共振器とし、それらを結合させた共振器ネットワークに生じる熱雑音を観測した。

図 1(a) のように、1 本の同軸ケーブルの両端を接地し、T アダプタを介して共振器内の熱雑音を増幅器(amp)に導く。スペクトラムアナライザ(SA)で雑音を測定すると、周波数 $f = nv/(2d)$ の共鳴ピークを観測できる。ここで、 v は高周波の位相速度、 d は共振器長、 n は正の整数である。このケーブルを図 1(b) のように T アダプタ(接地点までの足の長さ s)で接続すると、共振器が結合し、各モードは 2 本に分裂する。分岐点における電圧の連続性と電流の保存則より、結合強度は s/d になる。これを繰り返し、ケーブル 8 本を線形接続したときの雑音スペクトルを図 1(c) に示す。その共鳴周波数は、電子のタイト・バインディング模型と同形のハミルトニアンで表される。したがって、結合の長さを $s_1 < s_2$ にすると、中央にトポロジカルエッジモードが生じる。次に、線形共振器列の両端を接続し、

共振器リングにした。その雑音スペクトルの周波数は、図 1(d) のように $\cos K_i$ で表された。さらに、伝送線の伝播損失を考慮すると、タイト・バインディングハミルトニアンは非エルミートになる。ネットワークと環境が熱エネルギーを授受するからである。講演では、雑音スペクトルを解析し、損失のあるネットワークの PT 対称性について議論する。

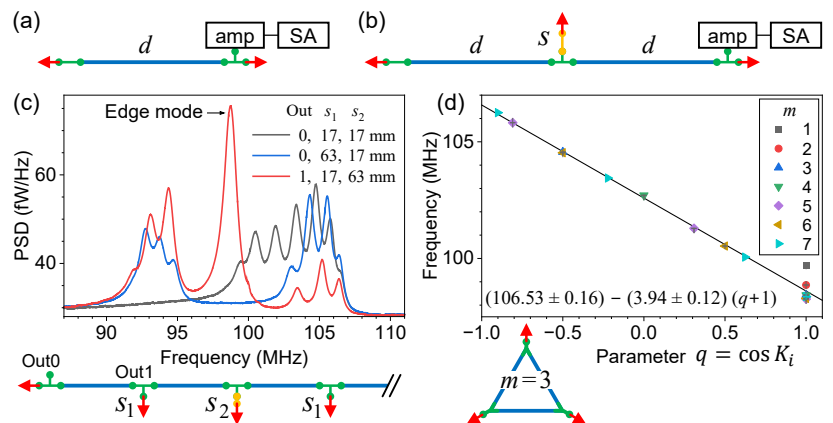


図 1. (a) 両端を接地した単一の伝送線共振器. (b) 結合した 2 個の共振器. (c) 測定された 8 個の共振器列の雑音 PSD (パワースペクトル密度). 共鳴の次数は $n = 1$. (d) 同強度で結合した m 個の共振器リングの分散関係.