

Extended-Vector Network Analyzer を用いたサブミリ波分光

(情報通信研究機構, 東工大)金森英人^a・笠井康子^{a,b}

Submillimeter wave spectroscopy using extended-Vector Network Analyzer

(Terahertz technology research center, NICT^a, Tokyo Institute of Technology^b)

Hideto Kanamori^a and Yasuko Kasai^{a,b}

【Abstract】

A Vector Network analyzer whose frequency is extended up to sub-millimeter wave region has been used to examine the usefulness of high resolution molecular spectroscopy. The spectral intensities of the rotational transitions of CH₃CN molecule were measured at rapid frequency scan from 330 to 500 GHz. Furthermore, S-parameter measurement gives us the both real and imaginary parts of reflex index at the transitions.

【序】

ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)は、周波数掃引信号源とヘテロダインレシーバーの両方を含み、測定対象に対する伝送波および反射波の位相と振幅情報を測定する装置で、フィルター、アンテナのようなパッシブデバイス、および増幅器などのアクティブデバイス等の様々なマイクロ波コンポーネントについて、S-パラメータに代表される特性測定に用いられている。一般には同軸ケーブルが使える RF (< 26GHz) 領域のものが主流であったが、近年、周波数通倍システムを組み込み、サブミリ波帯に拡張したものが市販されるようになってきている。今回我々は Extended-VNA の高分解能分子分光研究における有用性を確かめるために、サブミリ波を自由空間に取り出す分光システムを構築し、スペクトルピークの検出感度と強度測定の精度の評価を行った。具体的には、広帯域の高速シームレス掃引特性を活かした CH₃CN 分子のスペクトル線強度の回転量子数依存性を測定し、遷移強度を理論と比較することで、強度測定の信頼度を評価した。

【装置仕様と測定原理】

今回用いた Extended-VNA は Keysight 社の 2-port PNA-X N5242B (10MHz~26.5GHz)を基本とし、VDI 社の 36 通倍システムを組み込み、330 ~ 500GHz の帯域をカバーするものである。周波数精度は外部 ref クロックの精度で決まっている。周波数分解能はサンプリング点が最大 10⁵ なので、フル掃引した場合は 1.7MHz となる。分解能を優先する場合は掃引帯域を限定することになる。

VNA の測定原理は図1の内部構成図にあるように、シンセサイザー発振器からの信号波の一部はデバイダーで採取され、R1 でモニターされる。被測定物からの反射波と透過波は方向性結合器を

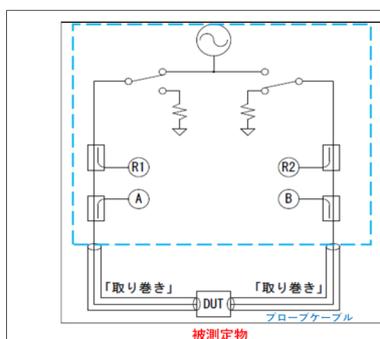


図 1 VNA の内部構成

信号源からの波は R1 で出射波の強度と位相を検波され、測定対象からの反射波は A、透過波は B で検波される。

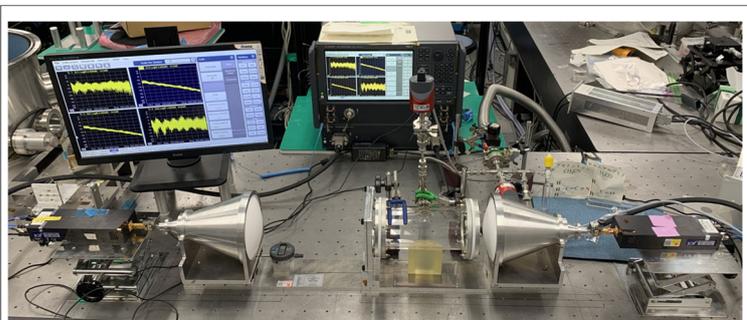


図 2. Ex-VNA 分光システムの全体写真

中央奥の VNA 本体からケーブルで接続された一対の通倍器とそれに続くレンズホーンアンテナ。光路中央には Calibration 用の反射板ホルダーと片側に挿入された大口径気体セル

介してそれぞれ A と B でヘテロダイン検波され、振幅と位相が検出される。スイッチの切り替えで、逆方向の特性を測定することができる。出射強度は最大でも数 $100\mu\text{W}$ 程度と推定されるが、図3の透過光強度に見られるように、その周波数依存性は急峻でかつ変化量も 10 倍以上と大きい。また、レシーバーで受ける信号強度についても、方向性結合器やハーモニックミキサーの周波数特性に依存するので、その絶対値を知ることは難しい。さらに、被測定物以外のプローブケーブルや本体内部のマイクロ波デバイスの特性の影響をキャンセルし、強度を規格化するためにはキャリブレーションと呼ばれる手続きと S -パラメータ測定のための内部データ処理が必要となる。

【実験】自由空間分光システムの構成は図2にあるように、 150mm ϕ の非球面レンズホーンアンテナから出射されたサブミリ波を、対向する同型のアンテナで受信する。サブミリ波ビームは光路中央で 5mm ϕ 以下のビームウエストに集光されており、光路の邪魔にならないように口径 100mm ϕ 、光路長 200mm の気体試料セルを挿入した。

【測定結果・解析・考察】

図3は 1.7MHz の分解能で $330 \sim 500\text{GHz}$ 全領域を 20 秒の高速掃引で得られたスペクトルを示す。桃色は $\text{CH}_3\text{CN} : 3\text{mmTorr}$ 、水色はサンプルが無い時の透過強度を図1中の B で検出したものである。10%に及ぶ細かい振動成分はアンテナ間の干渉フリンジ($\text{FSR} = 145\text{MHz}$)であるが、再現性が良いので両者の比を取って透過率とすると、赤で示すようにベースラインはフラットでノイズは 0.01 以下とすることができている。一方、VNA の S -パラメータ測定機能を用いて得られた S_{21} を図3に書き込んであるが、ほぼ赤色と重なり区別がつかないくらいよく一致した。SN 比では単純割算処理の方が優れているが、 S -パラメータ測定のメリットは位相シフトの情報を取得できることにある。図4に Doppler 幅で測定した $R(22)$ の S_{21} について、振幅と位相をスペクトルとして示すが、これは複素屈折率の実部と虚部が同時測定できていることを示している。

今回の測定は掃引時間 20 秒と短時間であることから、 K 分裂した $R(16)$ から $R(25)$ の純回転遷移を同一条件での観測結果として、各スペクトル線の強度を対称コマ分子の理論式 $S(J,K)^{1)}$ と比較した。結果の一部を図5に示す。 $S(J,K)$ から逆算される永久双極子モーメントは図5下図の様に 3%以内で収まっていることから、強度測定の信頼度を確認することができた。

【参考文献】 1) P. Bernath, Spectra of Atoms and Molecules (Oxford)

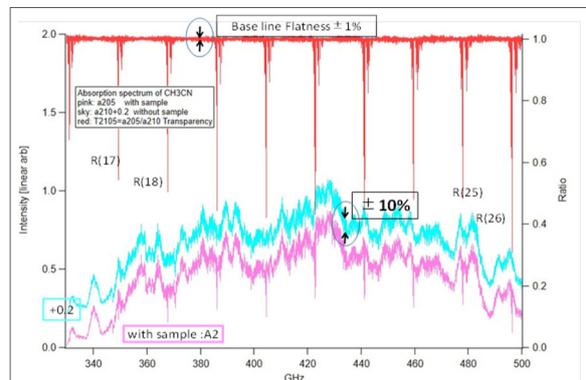


図3. CH_3CN の透過光強度(左)と透過率(右) 桃色は $\text{CH}_3\text{CN} : 3\text{mmTorr}$ のセル透過信号強度。水色はサンプル無しの透過強度に 0.2 のオフセットを付加。赤色は両者の比をとった透過率。その背後には S_{21} パラメータを灰色で示したが、ほぼ重なっている。 領域: $330 \sim 500\text{GHz}$ 、分解能: 1.7MHz 、掃引時間 20 秒。

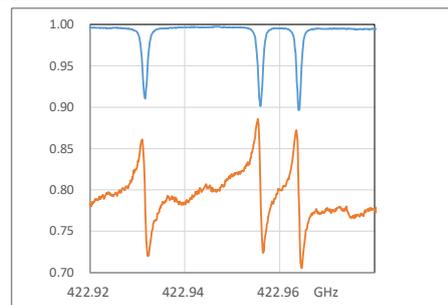


図4. S -パラメータの振幅と位相 CH_3CN $R(22)$, $K=2,1,0$ を圧力 3mmTorr 、分解能 100kHz で測定

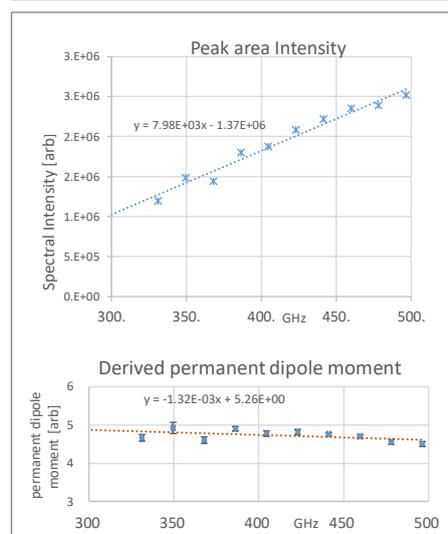


図5. CH_3CN $R(J,K=3)$ $J=17 \sim 26$ のスペクトル強度(上図)と理論式から算出される永久双極子モーメント(下図)