

長距離伝搬非回折光ビーム

有賀 規

通信総合研究所(〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

Nondiffracting Light Beams of Long Range Propagation

Tadashi ARUGA

Communications Research Laboratory, 4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received December 26, 2003)

An unusual light beam, long range nondiffracting beam (LRNB) is presented. The LRNB propagates over a long range keeping its narrow beam width as if it does not diffract, while general light beams spread by the diffraction effect. The new beam can be generated by a technique of wave front control, e.g., by a distorted concave spherical wave front that can be formed by a Galilean transmitting telescope with an eyepiece that has a spherical aberration. We will introduce some results of experiments as well as theoretical analyses of the LRNB generation using an unique optical system with a telescope and a laser.

Key Words : Light beam, Nondiffracting beam, Long range propagation, Wave front control, Spherical aberration

1. はじめに

自由空間を伝搬するレーザー光を含む光ビームは多くの分野で用いられている。長距離にわたって細い光ビームを生成したいという要請は多い。しかし、光ビームを含む電磁波は回折現象のため拡がってしまう。回折による拡がり角を $\Delta\theta$ とすると、 $\Delta\theta = \lambda/D$ (λ : 波長, D : 開口径)と表される。小さな拡がり角のビームを得るためには送信の開口を大きくしなければならない。しかし、この条件は細いビームを得ることと矛盾してしまう。従って、一般に長距離にわたって細い光ビームを生成することは不可能である。

最近、長距離伝搬非回折ビーム(LRNB: Long Range Nondiffracting Beam)が発見された¹⁾。この新しい光ビームは、その細いビーム幅を保ってあたかも回折をしないかのように長距離を伝搬する。LRNBの発見の契機となったのは、口径10 cmの送信望遠鏡でレーザービームを空間に伝送し、口径50 cmの望遠鏡で送信ビームをモニタする実験を行っていた時、大気による光ビームの散乱によって生ずる奇妙な美しい縞模様が見られた、ということである。モニタ画面に現れたこの画像に注目したため、不思議な現象を調査するきっかけとなり、長い年月を経てLRNBの発見となった。使用していた送信望遠鏡の球面収差のために一つの細いビームが生成され、その結果美しい縞模様が発生していたことが分かった(詳細は文献1参照)。元のビームの中心に細いサブビームが生成され、これがLRNBとなる。中心に生成される細いビームは長距離

を伝搬する非回折ビームとして作用しているのである。

LRNBはベッセルビーム(Bessel beam)と似ている。近似的なベッセルビームはDurnin²⁾, Durninら³⁾によって理論的且つ実験的に研究され“nondiffracting beam”あるいは“diffraction-free beam”と呼ばれている。この近似ベッセルビームは、1個のリングスリットと1枚の凸レンズで構成される光学系で生成された。実験では~1 mの距離内で非回折的に細いビーム幅を保って伝搬することが示された。この方法で波長オーダーの非回折的な細いビームを作ることも可能である。しかし、中心領域へのエネルギー集中度は極めて小さい。同様な種々の技術(例えば、空間フィルターを用いる方法やホログラフィーを用いる方法)が類似の非回折ビームを生成するのに用いられてきている^{4,6)}。今まで数10 mの距離の非回折ビームが実現されてきている。このような近似ベッセルビームは以前axiconの研究として関連研究が行われていた経緯がある^{7,8)}。

最近見つかったLRNBの、他の非回折ビームと異なる大きな特徴は、長距離(~100 m, ~km, ~10km, それ以上と、送信のビーム径によって可変)の伝搬が可能であること及び中心へのエネルギー集中度が高い(~30%)ことである。本論分ではこのLRNBについて紹介する。

2. LRNBの概念と生成方法

多くの光ビームの伝送で、コリメート(collimated)されたビームが用いられる。これは自由空間で光エネルギーを効率良く長距離伝送させるのにコリメート状態が最適

だからである。コリメートビーム(平行ビームともいう)の伝送の場合、Fig. 1に概念を示すように、平面波の光が放射される。

一方、LRNBは光波面を特殊な形状に制御することによって生成される。その形状は、波面の曲率が中心(光軸)より開口端へ行く程小さくなるような歪んだ球面にしなければならない。一つの具体的な方法として、球面収差を持ったガリレオ式望遠鏡(Galilean type telescope, Fig. 2参照)を用いる方法がある。正常な対物レンズ(凸レンズ系)と負の球面収差を持つ接眼レンズ(凹レンズ系)の組合せである。このような特殊な送信望遠鏡を用いることによって、元のビームの中心に細い芯のビームができる。この芯のビーム、即ち主ローブがLRNBに相当し(Fig. 3参照)、細いビーム幅を保って長距離伝搬する。

Fig. 4にはベッセルビーム生成の概念を示した。2次元的には2つの平行ビーム(平面波)がある角度をもって入射する図となるが、実際の3次元では、光軸に対して角度をもった平行ビームが軸対称で積分された状態で入射する。この時、一種の干渉効果によって中心(光軸)部に細いビームが生成され、非回折的に伝搬する。入射のビーム幅が(無限を含めて)十分大きい場合、ベッセルビームとなる。

近似ベッセルビームの生成方法としては、円錐レンズを用いたり、Durnin³⁾の実験のようにリングスリットと凸レンズを用いたりする方法がある。ベッセルビームの場合、中心部(main-lobe)が非常に細くなり非回折ビームが生成される反面、周辺に多数の(真のベッセルビームの場

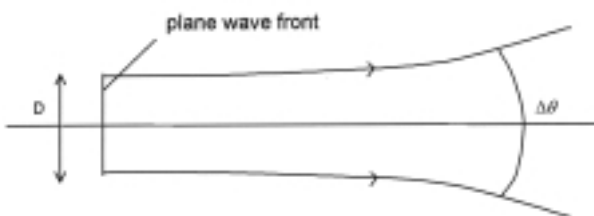


Fig. 1 General collimated beam.

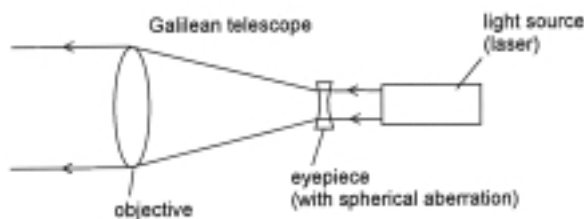


Fig. 2 Optical system for the LRNB generation.

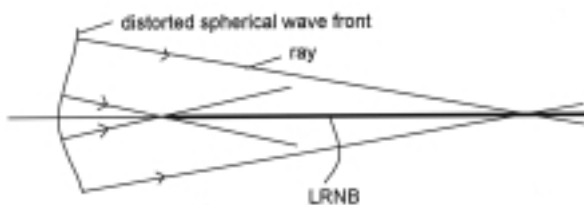


Fig. 3 Concept of the LRNB generation.

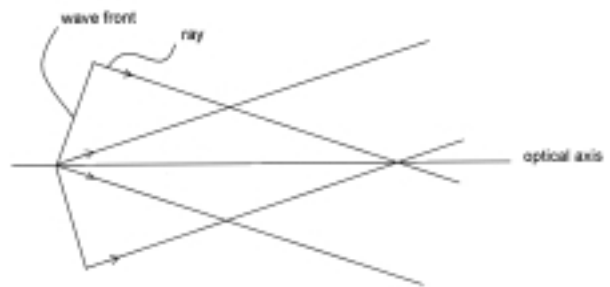


Fig. 4 Concept of the Bessel beam generation.

合無数のサイドローブ(side-lobe)が形成される²⁾ので、その分中心部の主ローブのエネルギーは非常に小さくなる。さらに、リングスリットを用いる方法で代表されるように、レーザービームの光学系への入力時に大きなエネルギー損失がある。また、非回折ビームの生成領域は余り長距離にはできない。

これに対してLRNBの場合には、上述のように長距離にわたって非回折的な光ビームを生成できることが特徴である。これは光ビームの波面の形状が平面状でなく周辺に行く程曲率が小さくなる歪んだ球面となっている故である。即ち、波面が周辺に行く程反り、光線の交点が長距離まで伸びるので長距離の非回折ビームが生成される。波面の形状は、送信望遠鏡の対物レンズと接眼レンズの距離を変えることによって制御できるので、その結果非回折ビームの生成距離領域を変えることができる。また、後で紹介されるように、サイドローブの数は少なく中心へのエネルギー集中度は(～30%程度と)十分大きいことも特徴の一つである。

3. LRNBの生成例：計算機シミュレーション及び実験

次に、長距離伝搬非回折ビーム(LRNB)について、計算機シミュレーション及び実際の実験例をいくつか紹介する。

正確な非回折ビームの理論解析はHuygens-Fresnel回折理論^{9,10)}によって行うことができる。伝搬路上のP点での光の状態(振幅)を $U(P)$ とすると、 $U(P)$ は次のような積分式で表される。

$$U(P) = c \iint A(\xi, \eta) \exp[-ikl(\xi, \eta)] d\xi d\eta, \quad (1)$$

ここで ξ と η はビーム伝送の開口での座標で、 $A(\xi, \eta)$ は各 (ξ, η) 点での振幅を表す。 k は波数(= $2\pi/\lambda$)、 l は点 (ξ, η) とP点との間の距離である。P点での光の強度 $I(P)$ は

$$I(P) = |U(P)|^2. \quad (2)$$

次に、この平面波のフレネル積分の式を任意の形状の波面の式に展開する。P点と開口内での点Qとの距離 l は近似的に次式で表される。

$$l = z + \frac{x^2 + y^2}{2z} - \frac{x\xi + y\eta + z\zeta}{z} + \frac{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}{2z}, \quad (3)$$

ここで、 (x, y, z) と (ξ, η, ζ) は各々点P, Qの座標である。3番目の座標 ζ は波面の形状 $h(\rho)$ に相当するので、

$$\zeta = h(\rho), \quad (4)$$

と表示できる．ここで， ρ は0～1で定義される半径方向距離である．放射されるレーザービームの軸対称性より，フレネル積分(1)式は次のように変換される．

$$U(P) = 2\pi a^2 c \int_0^1 A(a\rho) J_0\left(r \frac{k}{z} a\rho\right) \exp\left[-i\left(\frac{k}{2z} a^2 \rho^2 - k\zeta\right)\right] \rho d\rho, \quad (5)$$

ここで， a は開口の半径， z と $r = [(x^2 + y^2)^{1/2}]$ はP点の座標， J_0 は0次のベッセル関数である．(詳細は参考文献1を参照)．ここで， $\zeta \ll z$ 故に，一般に行われるように z と $\rho^2/2z$ 項から発生する位相項は無視されている．積分定数 c は $\int I(P) dx dy = 1$ となるように規格化される．

上述のように，LRNBは口径10 cmのガリレオ式送信望遠鏡でレーザービーム(アルゴンレーザー)を空間に伝送する実験の際見つかった．この理由により，最初に口径10 cmの光ビーム伝送によるLRNBの生成について紹介する．望遠鏡の対物レンズの焦点距離は40 cmである．従って， $F(=f/D)$ は4で，接眼レンズの焦点距離は5 cmに設定されている．

Fig. 5は，接眼レンズの球面収差が580 μm とした時に生ずる口径10 cmの送信レーザービームの波面の形状例である．前述のように，対物レンズと接眼レンズの距離を変えることによって波面の形状を制御できる．例えば，波面の周辺での反りを強くしたり(この場合ビームの拡がり大きくなるが，距離を伸ばせる)，周辺の波面を直線状にしたり(この場合距離は短くなるが，ビーム幅を一定にできる)することが可能である．Fig. 6(a)は計算機シミュレーション；光源にNd:YAGレーザー($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$)を用いた時の光軸に沿った多くの距離での光ビームパターン，を示す．Fig. 6(b)は実際に得られた光ビームの写真；距離500 mでのレーザービームパターン，を示す．中央の輝点がLRNBに相当する．周辺部が円形になっていないのは大気のゆらぎによる影響である．

次に，数100 mの距離を対象としたより短距離のLRNB

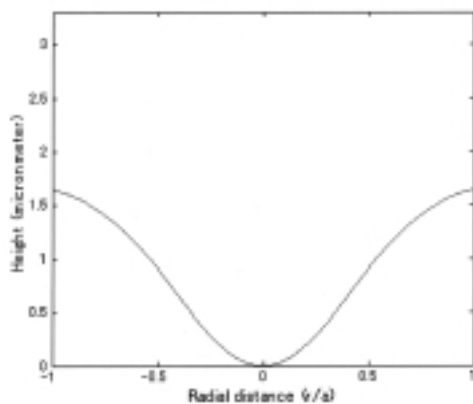


Fig. 5 Example of wave front profile.

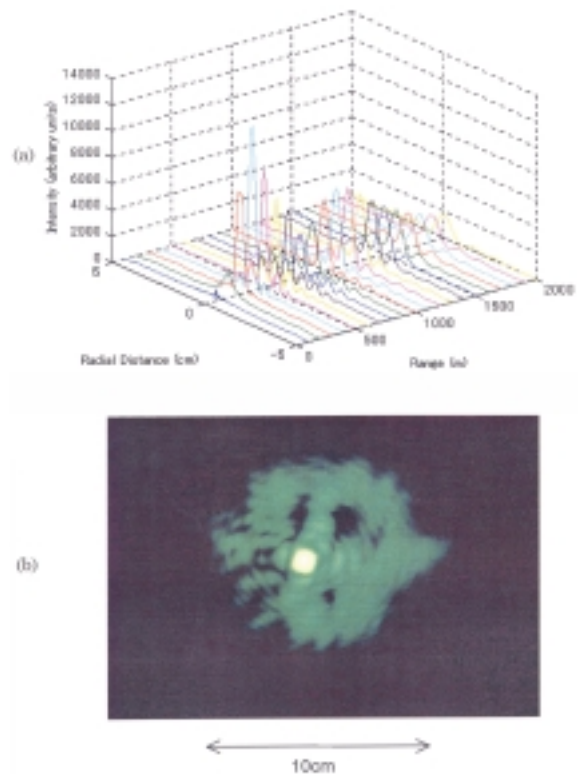


Fig. 6 LRNB generation by a telescope of 10 cm diameter. (a) Computer simulation of propagating laser beam pattern. LRNB is generated at the center of original beam with 10cm diameter. (b) Example of the LRNB photograph (distance 500 m). Central bright spot corresponds to the LRNB.

の生成について紹介する．Fig. 7(a)は口径2.5 cm，焦点距離10cmの望遠鏡を用いたLRNBの生成例である．ここでは波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ (He-Ne レーザー)が仮定されている．この図はFig. 6(a)同様，光軸に沿った伝搬レーザービームのパターンを示したものである．ビームは距離とともに少し拡がるが，mm幅のHe-Neレーザーが100 mで10 cm近く(1 kmでは1 m近く)拡がることに比較すれば，ビームの拡がりは著しく小さく非回折的である．伝搬距離100 mで撮ったレーザービームパターンの写真をFig. 7(b)に示した．中央の輝点がLRNBに相当する．

より長距離のLRNBの生成例も紹介する．長距離用として口径20 cm，焦点距離80 cm(前例と同様 $F = 4$ に設定)の送信望遠鏡を用いた．この場合小型のNd:YAG レーザー($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$)が光源として用いられた．Fig. 8(a)では計算機シミュレーションによって距離10 kmまでの伝搬レーザービームパターンが求められている．ごく最近この光学系によるLRNBの生成と伝搬実験が行われた．田無タワー(距離4.5 km)で撮られたレーザービームパターンの写真をFig. 8(b)に示した．中心の輝点がLRNBに相当する．周辺部は大気ゆらぎのために歪んで円形になっていないのが特徴である．

4. LRNBの特性

過去のLRNBの伝搬実験によって、いくつかのLRNBの特性が明らかになってきている。まず、LRNBに相当する中心のコアビーム部(主ローブ)は周辺部(サイドローブ)に比較して大気ゆらぎに対して変動が非常に小さく、より安定している。さらに、LRNBは一般のコリメートビームやフォーカスビーム(ある点に集光したビーム)に比較しても大気ゆらぎに対してより安定している。この事実は定量的にも測定され、報告されてきている¹¹⁾。

次に、LRNBに相当する主ローブのビーム幅は一般の光学系による回折限界のビーム幅より狭い、ということが計算機シミュレーションより明らかになっている¹²⁾。この事実は、一般の光学系の回折限界よりLRNBの光学系の方が分解能が高いということを示している。Fig. 9には、口径10cmのレーザービーム($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$)伝送時の距離1kmでのビームパターンの比較として、一般の光学系による回折限界のフォーカスビーム(a)及びLRNB(b)、を示した。

さらに、小さな口径の光学系で短距離の、大きな口径の光学系で長距離のLRNBが生成できる。例えば、口径2~3cmで数100m、口径~10cmで数km、口径50cmで~50kmのLRNBが生成できることが明らかになっている。これらをまとめると、下記のとおりである。

- 1) LRNB は細いビーム幅を保って長距離伝搬する。
- 2) LRNBは一般の光ビームよりも大気ゆらぎに対して影響が少なく安定している。
- 3) 広い領域で(一般の光学系の回折限界より高い)高分解

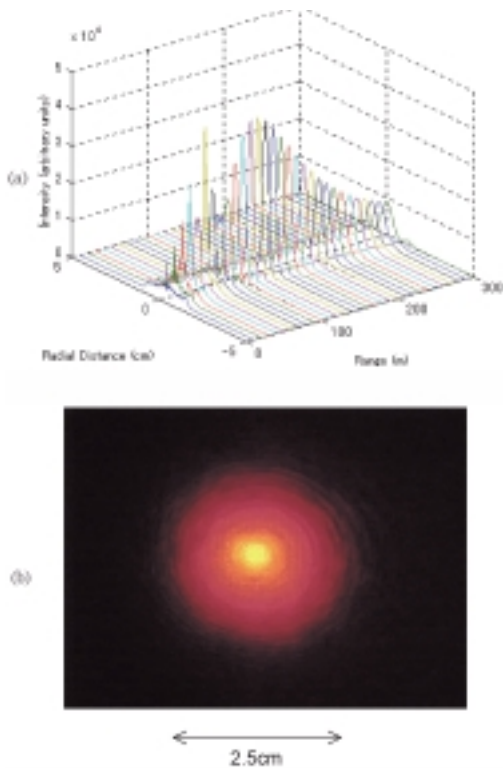


Fig. 7 LRNB generation by a telescope of 2.5 cm diameter. (a) Computer simulation of propagating laser beam pattern. LRNB is generated at the center of original beam with 2.5 cm diameter. (b) Example of the LRNB photograph (distance 100 m). Central bright spot corresponds to the LRNB.

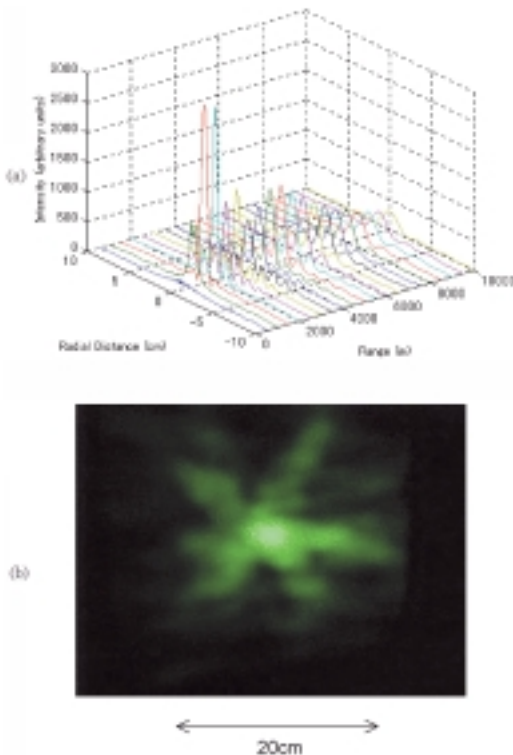


Fig. 8 LRNB generation by a telescope of 20 cm diameter. (a) Computer simulation of propagating laser beam pattern. LRNB is generated at the center of original beam with 20 cm diameter. (b) Example of the LRNB photograph (distance 4.5 km). Central bright spot corresponds to the LRNB.

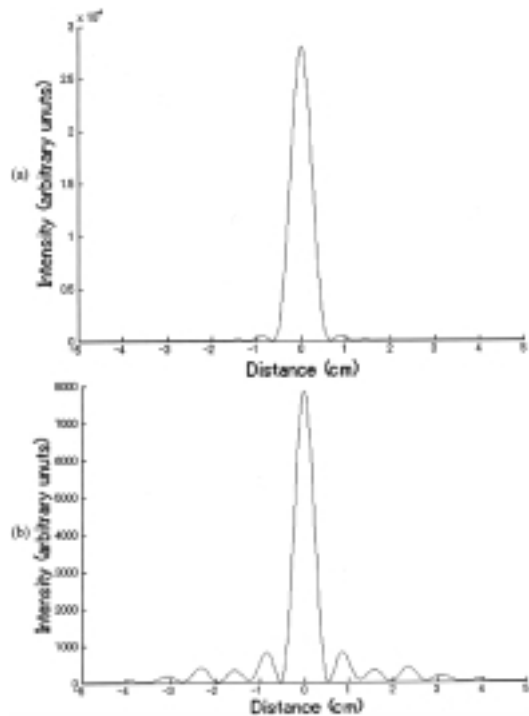


Fig. 9 Comparison of light beam patterns (intensity profiles), where use of original beam with 10 cm diameter, $0.53 \mu\text{m}$ wavelength and measurement at 1km distance, are assumed. (a) General diffraction-limited focused beam. (b) LRNB.

能を有している。

- 4) 小さな口径で近距離の、大きな口径で遠距離の、LRNBが生成できる。

5. 結 論

本論文では、ユニークな光ビームLRNBについて紹介した。この新しい光ビームの特徴として、細いビーム幅を保ってあたかも回折しないかのように長距離伝搬すること等が、計算機シミュレーション及び実験結果の例によって示された。本論文ではLRNBの一つの生成方法として、送信望遠鏡の接眼レンズに適度の球面収差を持たせた場合について紹介した。他の方法として補正板を用いる方法もある¹³⁾。口径2.5 cm, 10 cm, 20 cmの望遠鏡を用いたLRNBによって、数100 mから～10 kmの範囲の距離の非回折ビームが可能であることが示された。より小型、大型の光学システムによって、より短、長距離のLRNBの生成が可能である。LRNBは種々の独特な特性を有しているので、多くの分野での応用が期待できる。

謝 辞

LRNB光学系の製作及び実験に御協力いただいた新日本科学製作所の道野氏に深く感謝を申し上げる。また、口径20 cm光学系実験で支援をいただいた同所の飯田、中島氏及びCRLの国森氏とSCATの吉門氏にも感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) T. Aruga: Appl. Opt. **36** (1997) 3762.
- 2) J. Durmin, J. J. Miceli, Jr., and H. J. Everly: J. Opt. Soc. Am. **A4** (1987) 651.
- 3) J. Durmin: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1449.
- 4) K. Uehara and H. Kikuchi: Appl. Phys. B **48** (1988) 125.
- 5) A. J. Cox and J. D'Anna: Opt. Lett. **17** (1992) 232.
- 6) J. Turnen, A. Vasara, and A. T. Friberg: Appl. Opt. **27** (1998) 3959.
- 7) H. McLeod: J. Opt. Soc. Am. **44** (1954) 592.
- 8) S. Fujiwara: J. Opt. Soc. Am. **52** (1962) 287.
- 9) M. Born and E. Wolf: *Principle of Optics* (Pergamon, Oxford, UK, 1975).
- 10) N.G. Van Kampen: Physica **24** (1958) 437.
- 11) T. Aruga, S. W. Li, S. Yoshikado, M. Takabe, and R. Li: Appl. Opt. **38** (1999) 3152.
- 12) T. Aruga and S. W. Li: Appl. Opt. **38** (1999) 2795.
- 13) T. Aruga: Japanese Patent 8-23379 (17 January 1996).