Modelli anisotropi di covarianza del contributo atmosferico di dati DInSAR

Antonella Belmonte, Alberto Refice, Fabio Bovenga, Guido Pasquariello

ISSIA-CNR, via Amendola 122/D 70126 Bari, Italy, tel +39 080 5929432 fax +39 080 5929460,
e-mail {belmonte,refice,bovenga,pasquariello}@ba.issia.cnr.it

Riassunto

Nello studio di deformazioni superficiali tramite interferometria SAR differenziale (DInSAR) è necessario stimare e sottrarre la parte di segnale dovuta alle disomogeneità atmosferiche.

A tale scopo vengono spesso utilizzati modelli stocastici per descrivere il ritardo di fase atmosferico nelle immagini DInSAR. In prima approssimazione questi ritardi di fase sono modellati come isotropi, ma ciò è una semplificazione poiché le immagini InSAR mostrano spesso anomalie atmosferiche evidentemente direzionali. Ciò ha portato recentemente alla proposta da parte di più gruppi di adottare modelli anisotropi per la stima del contributo atmosferico.

L'uso di modelli anisotropi comporta un considerevole aggravio computazionale per la stima dei parametri della funzione di correlazione rispetto al caso isotropo. Inoltre, l'efficacia della stima di parametri anisotropi può diminuire qualora si faccia uso di interferogrammi con pochi punti sparsi utilizzabili, come nel caso delle applicazioni multi-temporali (*persistent-scatterers interferometry*, o PSI). Nel presente lavoro si effettua una revisione critica degli aspetti principali che influiscono sulla scelta di adottare un modello anisotropo per il ritardo interferometrico di fase atmosferica e viene valutato in maniera quantitativa il vantaggio dato dal *modeling* anisotropico del contributo atmosferico nel caso di stime su griglie sparse di punti. I risultati sembrano confermare che la maggior fedeltà descrittiva dei modelli anisotropi può in alcuni casi non essere sufficiente a giustificarne l'uso in applicazioni di tipo PSI.

Abstract

When studying geophysical processes through Differential SAR Interferometry (DInSAR) it is necessary to estimate and subtract signals due to atmospheric inhomogeneities.

To this end, stochastic models are often used to describe atmospheric phase delay in DInSAR data. As a first approximation, these phase delays are usually modelled as isotropic, though this is a simplification, because InSAR images often exhibit evidently directional atmospheric anomalies. This brought several research groups to advocate the use of anisotropic models for atmospheric phase estimation.

However, anisotropic models lead to increased computational loads to estimate the correlation function parameters with respect to the isotropic case. Moreover, the performance in estimating anisotropic parameters can degrade when use is made of interferograms with only a few sparse points usable for computations, such as in the case of persistent scatterers interferometry (PSI) applications. In the present work we analyse critically the main aspects connected with using anisotropic models for DInSAR atmospheric delays, and we evaluate the advantage given by anisotropic modelling of atmospheric phase in the case of sparse grids of points. Results seem to confirm that the higher descriptive fidelity of anisotropic models may not be sufficient, in some cases, to justify their use in PSI applications.

Introduzione

La tecnica nota come interferometria SAR differenziale (DInSAR) permette di osservare spostamenti millimetrici della superficie terrestre confrontando i valori di fase di due o più immagini della stessa area riprese da un radar ad apertura sintetica (SAR) in momenti diversi.

Come è noto, le misure DInSAR risentono della presenza di contributi aggiuntivi dovuti a varie cause, il principale dei quali è quello dato dalla diversa distribuzione spaziale delle disomogeneità troposferiche all'istante delle due acquisizioni SAR. Per la maggior parte delle applicazioni di tipo quantitativo, tale contributo deve essere stimato e rimosso. Riuscire a distinguere, in un interferogramma differenziale, il segnale atmosferico da quello di deformazione può non essere un compito banale, perché i segnali di fase causati dal ritardo atmosferico e da deformazioni moderate possono avere ampiezze simili e, talvolta, estensioni spaziali confrontabili. La separazione viene quindi operata di solito basandosi su fattori statistici.

È possibile utilizzare modelli che descrivono la struttura di variabilità (autocorrelazione spaziale) dello strato atmosferico, basati sulla teoria delle funzioni random. In Hanssen (2001), viene studiato dettagliatamente il *mapping* degli effetti atmosferici sulle misure DInSAR, notando come la parte di segnale atmosferico relativa all'interferometria SAR sia dovuta essenzialmente alle disomogeneità spaziali del vapor d'acqua troposferico. Utilizzando la teoria della turbolenza di Kolmogorov è possibile postulare, per il cosiddetto APS (*Atmospheric Phase Screen*), un comportamento stocastico di tipo frattale, con spettro di potenza di tipo *power-law*. Oltre al modello puramente frattale (o multifrattale, come a rigore va considerato il modello multi-scala), è possibile considerare altri modelli di covarianza, come ad es. la classe di modelli noti come funzioni di Matérn, che include come casi particolari il modello esponenziale e quello gaussiano. Tali modelli risultano più facilmente trattabili dal punto di vista matematico. Per una trattazione dettagliata si veda ad es. Cressie (1993) o Stein (1999).

Come accennato, la possibilità di sfruttare la modellistica stocastica come filtro per separare la componente atmosferica da altri segnali di interesse (tipicamente quello di deformazione) risulta spesso associata a tecniche di analisi basate su bersagli puntuali, quali l'elaborazione di lunghe serie temporali di immagini SAR tramite le cosiddette tecniche PSI (*persistent scatterers interferometry,* Ferretti et al., 2001). Tecniche di interpolazione quali il kriging risultano vantaggiose in questo contesto, in quanto affiancate da modelli analitici della covarianza spaziale del segnale da ricostruire.

Nella maggior parte dei casi tali tecniche fanno uso di modelli stocastici con comportamento isotropico, in cui la struttura delle variazioni spaziali è indipendente dalla direzione. L'assunzione di un modello stocastico isotropo, per quanto semplice da trattare, è in realtà una semplificazione, poiché il segnale di fase atmosferica nelle immagini InSAR presenta spesso caratteristiche direzionali abbastanza evidenti, come descritto anche in letteratura (ad es. Knospe et al., 2007).

Sembra quindi opportuno modificare la procedura introducendo modelli di superfici frattali anisotrope. Il *framework* descrittivo delle funzioni di autocorrelazione anisotrope può essere adattato in maniera semplice alle tecniche di interpolazione quali il Kriging.

Tuttavia, un modello stocastico anisotropo risulta ovviamente più complesso di uno isotropo, in quanto il numero di parametri coinvolti è maggiore. L'aggravio computazionale e la maggior complessità connessa all'estensione del modello ad una forma anisotropa potrebbe quindi, in alcuni casi, superare il vantaggio dato dall'uso di un modello più adatto a descrivere il dato. C'è inoltre da considerare il fatto che la quantità di dati coinvolta in una tipica analisi PSI è tale da scoraggiare un approccio "interattivo", che permetterebbe ad un utente "esperto" di valutare, ad esempio, valori iniziali ottimali o forme parametriche opportune affinché la procedura di stima abbia successo. È allora opportuno chiedersi sotto quali ipotesi ed entro quali limiti l'uso di modelli anisotropi conduca effettivamente ad un vantaggio nell'ambito di tecniche di analisi di dati SAR multitemporali basate su bersagli puntiformi.

In questo lavoro proponiamo alcune considerazioni basate su semplici esperimenti effettuati sia su dati simulati che su interferogrammi reali.

Funzione di autocorrelazione, variogramma e kriging

Il (semi)variogramma, γ, conosciuto anche come funzione di struttura, è definito come la varianza degli incrementi di una data variabile regionalizzata Z (Cressie, 1993):

$$2\gamma(u_i,u_j)=Var\left[Z(u_i)-Z(u_j)\right]=E\left[\left(Z(u_i)-Z(u_j)\right)^2\right]. \quad (1)$$

Sotto l'ipotesi di un modello stazionario al 2° ordine, la funzione γ dipende dal vettore distanza **h** tra i punti u_i e u_j. La condizione di isotropia implica una dipendenza soltanto dal modulo h della distanza. Nel caso più generale, invece, se il variogramma subisce variazioni anche al variare dell'angolo θ di orientazione del vettore distanza **h**, la variabile regionalizzata è detta anisotropa.

Se il modello ammette la definizione di una funzione di autocorrelazione C, la relazione $\gamma(\mathbf{h})=C(0)-C(\mathbf{h})$ lega le due quantità. Il variogramma è solitamente valutato sperimentalmente mediante uno stimatore basato sul metodo dei momenti :

$$\gamma(\mathbf{h})=\frac{1}{2|N(\mathbf{h})|}\sum_{i,j\in N(\mathbf{h})}\left[Z(u_i)-Z(u_j)\right]^2, \quad (2)$$

dove $N(\mathbf{h})$ è l'insieme delle coppie di punti separati da una distanza **h** ed $|N(\mathbf{h})|$ rappresenta il numero di coppie distinte in $N(\mathbf{h})$. Una volta stimato il variogramma sperimentale secondo la (2), è possibile inferire un modello analitico mediante metodi di *fit* statistico quali LMS (*least mean squares*) o ML (*maximum likelihood*).

Tutti i modelli di covarianza citati in precedenza sono facilmente adattabili al caso semplice di anisotropia geometrica (segnali con anisotropia zonale, più complessa, sono rari e non vengono quasi mai considerati nelle applicazioni reali, cfr. Cressie, 1993), trattando la distanza **h** come un vettore e definendo quindi due parametri aggiuntivi che determinano la trasformazione da applicare al vettore **h** per rendere la funzione C (e quindi γ) isotropa. In formule, il vettore distanza **h** viene trasformato in $\mathbf{h}'$ con:

$$\mathbf{h}'=\mathbf{S}\,\mathbf{R}\,\mathbf{h}=\begin{bmatrix}\sqrt{\delta} & 0\\ 0 & 1/\sqrt{\delta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\mathbf{h}. \quad (3)$$

I parametri δ e θ sono i parametri aggiuntivi che determinano l'anisotropia.

La Figura 1 riporta due esempi di interferogrammi differenziali tandem della coppia di sensori SAR ERS-1/2, acquisiti su una zona del sud Italia. Il segnale contenuto in queste immagini può essere considerato esclusivamente dovuto all'atmosfera, in quanto le altre componenti sono trascurabili.

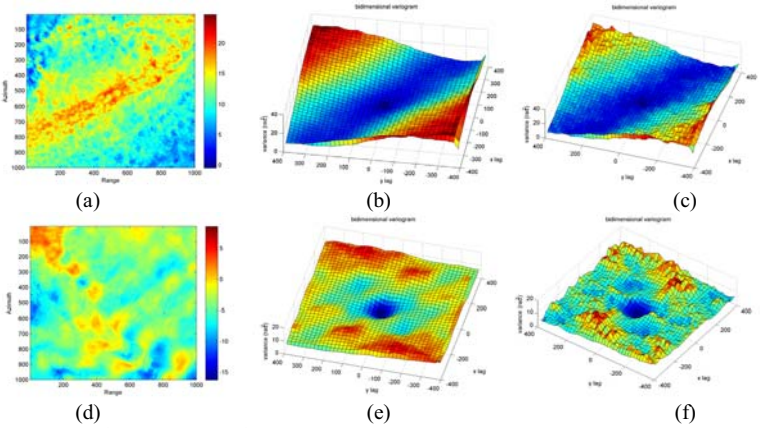

Figura 1. Interferogrammi differenziali tandem ERS-1/2 e rispettivi variogrammi calcolati su un numero di punti variabile. (a)-(d) interferogrammi relativi rispett. alle date 23-24 Luglio 1995 e 24-25 Marzo 1996; il colore è proporzionale alla fase assoluta; fattore di multilook 10x2; (b)-(c) variogramma bidimensionale dell'interferogramma in (a), stimato sui pixel con coerenza maggiore rispett. di 0.85 e 0.9. (e)-(f): analogamente per l'interferogramma in (d).

Le immagini mostrano in maniera evidente strutture di variazione anisotrope, dato confermato dal variogramma di entrambe le superfici stimato su un numero di punti molto alto, ottenuto scegliendo i punti più affidabili (pannelli b ed e, densità di campionamento dell'ordine del 20-30% dei pixel). Quando però i punti di stima dimiuiscono drasticamente (pannelli c ed f, densità dell'ordine del 3-5%), solo le anisotropie più forti continuano ad essere apprezzabili (c), mentre per casi meno evidenti la stima risulta più confusa (f).

Simulazioni

Per indagare l'effetto dell'anisotropia sulla procedura di stima sono state effettuate simulazioni di campi random con struttura di correlazione anisotropa. Si è poi proceduto ad effettuare la stima dei parametri statistici a partire da un certo numero di punti campionati della superficie, e la sua interpolazione utilizzando modelli sia isotropi che anisotropi, con l'intento di indagare quanto la maggior complessità computazionale connessa al processo di stima anisotropo sia effettivamente vantaggiosa nel caso di densità variabile dei punti di stima.

In termini più precisi, la questione che si vuole indagare è la seguente: l'evidenza della presenza di anisotropie nella struttura spaziale del contributo di fase atmosferico proviene per la maggior parte dei casi dall'osservazione di interferogrammi in cui il rumore di fase è relativamente basso (cfr. esempi riportati in Knospe et al., 2007 ed anche in Hanssen, 2001); in questi casi il numero di elementi dell'immagine disponibili per la stima dei parametri del contributo atmosferico è molto alto, comparabile con il numero totale di pixel dell'interferogramma. Ma cosa succede nel caso in cui si analizzino interferogrammi rumorosi? In questo caso il numero di pixel utilizzabili per la stima decresce drasticamente.

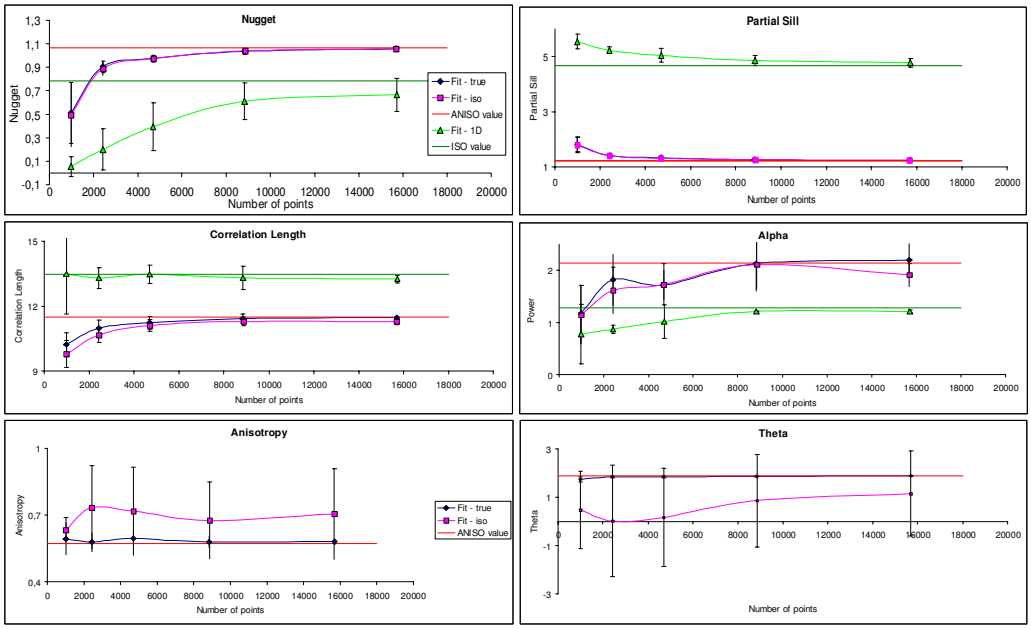

Figura 2. Parametri stimati su dati simulati con correlazione spaziale di tipo Matérn, tramite fit LMS pesato (pesi proporzionali al numero di campioni in ogni bin), in funzione del numero di punti utilizzati per la stima. I grafici riportano i parametri ottenuti dal fit con modello anisotropico, utilizzando come guess values *i valori "veri" (Fit – true) oppure i valori riferiti ad un modello isotropico (Fit – iso), e quelli ottenuti da fit con un modello isotropico (Fit – 1D). Le linee orizzontali rappresentano i valori dei rispettivi parametri stimati utilizzando tutti i punti della superficie (200x200 campioni), con modello anisotropo ("ANISO value") e isotropo ("ISO value"). Gli ultimi due grafici in basso rappresentano i fit dei parametri di anisotropia, disponibili ovviamente solo nel caso di fit anisotropo.*

Nel caso limite di applicazioni di tipo PSI, in cui gli interferogrammi analizzati possono avere *baseline* sia spaziali che temporali molto grandi, i pixel utilizzabili sono solo quelli corrispondenti a bersagli stabili, che tipicamente non superano alcune decine per km^2, specialmente in aree poco urbanizzate. In tali casi dunque, poiché la stima diventa più ardua, è lecito chiedersi fino a che punto l'utilizzo di modelli anisotropi sia vantaggioso ai fini della rimozione efficace del contributo atmosferico.
In **Figura 2** sono riportati i grafici relativi ai valori dei parametri stimati sui campi di fase simulati utilizzando il modello di correlazione di Matérn, campionati su un numero di punti variabile, scelti a caso. I valori riportati sono medie effettuate su un certo numero di realizzazioni indipendenti. Le barre di errore rappresentano la dispersione di queste misure, calcolate come *standard deviation*.
È possibile osservare come, al diminuire dei punti di stima, tutti i parametri si discostano sempre più dal valore atteso. Il peggioramento al diminuire del numero di punti è grossomodo simile per tutti i parametri, e mostra una sostanziale robustezza delle stime fino a densità di campionamento di circa il 10-12%. Come è lecito attendersi, i valori dei parametri ottenuti usando un modello anisotropo differiscono significativamente da quelli ottenuti sugli stessi dati usando un modello isotropo; tuttavia le stime dei due modelli si mantengono robuste in riferimento ai rispettivi valori stimati su tutti i punti della superficie simulata.
Si osservi inoltre come i valori dei parametri di anisotropia, anch'essi oggetto della procedura di *fit* nel caso di modello anisotropo, risultino criticamente dipendenti dal valore iniziale assegnato all'algoritmo di *fit* (LMS pesato). Quando il valore iniziale di stima si discosta da quello vero, i risultati divergono significativamente.

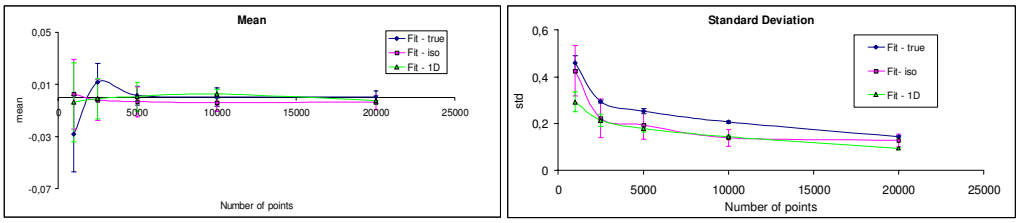

Figura 3. Media e deviazione standard dell'errore di ricostruzione al variare del numero di punti campionati.

La **Figura 3** illustra invece il confronto tra le superfici simulate e quelle ricostruite tramite kriging, a partire da un modello i cui parametri sono stati stimati come descritto nella figura precedente. I grafici riportano i valori della media e della standard deviation delle differenze fra la superficie originale e quella ricostruita, al variare del numero di punti usati per la stima dei parametri del variogramma. Anche questi valori sono medie su un certo numero di esperimenti indipendenti.
I valori medi della ricostruzione non mostrano scostamenti significativi dal valore nullo. Le standard deviation delle differenze hanno invece, come previsto, un andamento decrescente al crescere del numero di punti. Anche in questo caso, le performance della ricostruzione diventano sostanzialmente instabili per densità di campionamento inferiori al 10-12%, confermando i risultati concernenti la stima dei parametri, riportati nella figura precedente.
Meno semplice risulta invece il confronto fra le ricostruzioni ottenute dal fit con i 3 metodi descritti in precedenza. In questo caso i risultati del kriging mediante fit del variogramma con un modello isotropo appaiono addirittura leggermente più precisi di quelli ottenuti utilizzando un modello anisotropo, che teoricamente si adatta meglio alla superficie generata. I risultati con modello anisotropo partendo, per il fit, da una configurazione isotropa (serie di dati "Fit – iso") appaiono in media più precise dei corrispondenti valori ottenuti utilizzando un modello fittato a partire dai valori "veri" della superficie simulata (serie di dati "Fit – true"), anche se la dispersione è molto maggiore, indice di maggiori fluttuazioni statistiche dei risultati.
In pratica, dunque, l'uso del modello di variogramma isotropo sembrerebbe più vantaggioso, ai fini della ricostruzione, rispetto al modello anisotropo, che pure si adatterebbe meglio alla natura dei

dati. Le seguenti considerazioni possono aiutare a fare luce sui risultati ottenuti.

1) Come accennato nell'introduzione, nell'operazione di kriging la massima influenza è rivestita dai punti immediatamente vicini al sito che si sta ricostruendo. Questo implica che l'aspetto più importante della funzione di autocorrelazione stimata sia come essa si comporta nei dintorni dell'origine. Le proprietà di anisotropia della funzione di autocorrelazione, invece, sono ben stimabili solo utilizzando valori di distanza significativamente lontani dall'origine. La conseguenza è che la caratteristica di anisotropia della superficie, apparentemente, è meno significativa, nell'operazione di ricostruzione, rispetto ai fattori che caratterizzano il comportamento vicino all'origine della sua funzione di autocorrelazione; ciò trova conferma indiretta anche nella estrema sensibilità del fit dei parametri di anisotropia al valore iniziale, avendo usato nel fit pesi proporzionali al valore di $|N(\mathbf{h})|$ nella (2), quindi tipicamente decrescenti man mano che ci si allontana dall'origine.
2) Nell'applicare lo stimatore del variogramma (2) per un modello anisotropo, il numero di intervalli di stima utilizzati per raggruppare le distanze sarà tipicamente superiore al caso isotropo, nel quale le distanze vengono classificate solo in base al loro modulo. Conseguentemente, il numero di punti mediamente presenti in ogni intervallo sarà inferiore nel caso anisotropo, e quindi anche la stima tramite kriging risentirà di questa maggiore incertezza.

In pratica, quindi, gli esperimenti sembrerebbero puntare verso la possibilità che, nella situazione in cui il numero di punti utilizzato per la stima è ridotto, utilizzare un modello più semplice per la modellizzazione e il filtraggio del segnale atmosferico possa dare risultati migliori rispetto a quelli ottenuti con modelli più sofisticati ma meno robusti e quindi più critici per quanto riguarda la stima dei parametri. Ulteriori analisi sono in corso per approfondire meglio le questioni sollevate dagli esperimenti descritti.

Conclusioni

In questo lavoro si sono affrontati alcuni aspetti del problema della stima automatica dei parametri statistici del contributo di fase atmosferica su interferogrammi differenziali SAR. In particolare, si è investigato l'effettivo vantaggio dato dalla stima ed interpolazione del contributo atmosferico tramite tecniche di kriging a partire da dati puntuali sparsi, facendo uso di modelli di covarianza anisotropi, in confronto al caso approssimato con modelli isotropi. L'analisi è stata effettuata su campi di fase simulati con funzione di covarianza assegnata, e su alcuni interferogrammi SAR reali.

I risultati mostrano come, in generale, al diminuire della densità di punti, le performance della procedura di stima dei parametri peggiorano, pur rimanendo accettabili fino a densità di campionamento superiori al 10% circa.

Il confronto fra le procedure di ricostruzione tramite kriging facendo uso di modelli isotropi ed anisotropi mostra invece come le maggiori fluttuazioni nella misura del variogramma sperimentale causino tutto sommato un'efficienza relativamente peggiore rispetto a metodi di stima più "sofisticati" come nel caso di un modello anisotropo, rispetto ad un modello isotropo che permette stime più robuste.

Riferimenti bibliografici

Cressie N. A. C. (1993), *Statistics for Spatial Data (revised edition)*, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Knospe S., Jónsson S.(2007), " Covariance estimation for dInSAR deformation measurements in presence of strong atmospheric anisotropy ", Envisat Symp. Montreux, European Space Agency

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), "Permanent scatters in SAR Interferometry", IEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 8-20

Hanssen R.F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 328 pp. ISBN: 0-7923-6945-9

Stein M.L. (1999), *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*. Springer, New York.